



Rapport Climat

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

novembre 2019



Table des matières

À propos	4
Résumé	5
1. Changements climatiques observés et futurs	8
1.1 Contexte et objectifs	8
Contexte global du changement climatique	8
Contexte du changement climatique dans l'Espace Mont-Blanc (EMB)	9
Objectifs du rapport: scénarios climatiques et secteurs socio-économiques	11
1.2 Changements climatiques récents observés dans le massif du Mont-Blanc depuis 1900	12
Températures	12
Précipitations	13
Événements extrêmes	14
1.3 Projections climatiques dans le massif du Mont-Blanc pour les futures décennies	17
Températures	17
Précipitations	21
Jours de gel et de glace	23
Événements extrêmes de canicules	25
Événements extrêmes de sécheresses	28
Événements extrêmes de précipitations fortes	29
2. Évolution des milieux naturels physiques et vivants	32
2.1 Réduction de l'enneigement	32
2.2 Retrait glaciaire	34
2.3 Dégradation du permafrost	36
2.4 Remontée en altitude de la faune et la flore	37
2.5 Avancée du printemps et allongement de la durée de végétation	38
2.6 Pullulation et disparition d'espèces	40
3. Impacts sur les secteurs socio-économiques	42
3.1 Eau	42
3.2 Agriculture	45
Cycles des pathogènes	45
Viticulture	48
Gelées tardives	50
Stress pour les vaches laitières	54
3.3 Forêts	55
Modification de la composition des peuplements forestiers	55
Remontée de la limite de la forêt	56
Augmentation de la surface et la productivité des forêts de montagne	58
Risque de pullulation de parasites et de maladies attaquant les arbres	59
3.4 Patrimoine naturel, conservation et biodiversité	59
Impact sur la flore : remontée des espèces	60

Impact sur la flore d'un enneigement réduit	61
Impact sur la diversité et les habitats	61
Impacts sur la faune	63
Impacts sur les stratégies de conservation	64
3.5 Tourisme	66
Tourisme d'hiver	66
Tourisme estival et hors-saison	71
L'alpinisme à l'épreuve du climat	77
Quel avenir pour le tourisme glaciaire dans les Alpes ?	80
3.6 Risques naturels	82
4. Conclusion	88
Annexe 1 : Choix et traitement des données climatiques utilisées	91
Données spatiales CHELSA	91
Données temporelles de station : CH2018	93
Annexe 2 : Bibliographie	94
Annexe 3 : Définitions et acronymes (définitions signalées par un * dans le texte)	100

À propos

Auteurs

Edoardo Cremonese^{1*}, Brad Carlson^{2*}, Gianluca Filippa¹, Paolo Pogliotti¹, Irene Alvarez², Jean Pierre Fosson³, Ludovic Ravanel⁴ & Anne Delestrade²

¹ Agence Régionale pour la Protection de l'Environnement en Vallée d'Aoste (ARPA VdA), Unité Changement Climatique, Loc La Maladière 48, Saint-Christophe 11020, Italie

www.arpa.vda.it/climatechange/

* e.cremonese@arpa.vda.it

² 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

³ Fondazione Montagna Sicura, Località Villard de la Palud, 1, 11013 Courmayeur, Italie

www.fondazionemontagnasicura.org

⁴ EDYTEM Lab, University Savoie Mont-Blanc, CNRS, 73376 Le Bourget-du-Lac, France

Pour citer ce rapport

Cremonese E., Carlson B., Filippa G., Pogliotti P., Alvarez I., Fosson JP., Ravanel L. & Delestrade A. AdaPT Mont-Blanc : Rapport Climat: *Changements climatiques dans le massif du Mont-Blanc et impacts sur les activités humaines*. Rédigé dans le cadre du projet AdaPT Mont-Blanc financé par le Programme européen de coopération territoriale Alcotra Italie-France 2014-2020. Novembre, 2019, 101 p

novembre, 2019

Résumé

Changements observés

Dans l'Espace Mont-Blanc (EMB), depuis la fin des années 1980, les températures annuelles moyennes ont augmenté entre 0,2 et 0,5° C par décennie. La hausse des températures a eu lieu surtout au printemps et en été. Aucune tendance significative n'a été observée dans le cumul des précipitations annuelles. La fréquence des journées caniculaires a augmenté de manière significative.

Changements attendus

L'augmentation des **températures** annuelles se poursuit avec un **réchauffement attendu de 1 à 2 °C d'ici 2035** par rapport à la moyenne 1980-2010: le réchauffement pendant l'hiver (décembre à février) sera d'environ 1 °C et de 1,5 à 2 °C en moyenne en été. Pour 2050, on s'attend à un réchauffement d'entre 2 et 3 °C, toujours plus marqué pendant la saison estivale. En été, l'isotherme* 0°C remonte de 300 m de dénivelée, passant de 3 800 m aujourd'hui pendant la saison estivale à 4 100 m en 2050. D'ici la fin du 21e siècle, un réchauffement de 3 à 6 °C est prévu, selon le scénario d'émission.

Dans un futur proche (2035) en moyenne (1000-2000 m) et en haute (> 2400 m) montagne, une **réduction des jours de glace*** de l'ordre du 15/20% est attendue ; cette réduction sera de plus d'un mois en 2050, et jusqu'à deux mois pour le scénario pessimiste d'ici 2100. Dans les fonds de vallée, dès 2035, on s'attend à passer **de 2 à 6/10 jours caniculaires* par année**, pour atteindre entre 15 et 20 jours caniculaires en moyenne en 2050.

Concernant les **précipitations** annuelles, l'incertitude des modèles est plus forte : la quantité totale ne devrait pas changer par rapport à la moyenne 1980-2010 mais se répartir différemment entre les saisons. Les **précipitations hivernales vont augmenter** (5/15 %). Néanmoins, les **précipitations estivales devraient diminuer** de 5/10 % en 2035 et de 10/20 % en 2050 et en fin du siècle. La conjonction de températures plus élevées et de précipitations réduites pendant la période estivale entraînera aussi des risques de sécheresse plus importants : une **réduction du bilan hydrique estival*** entre 15/40 % est attendue dès 2035 à toutes les altitudes. La fréquence des événements de fortes précipitations devrait également s'accroître : la **quantité totale de précipitations qui tombera pendant les événements extrêmes** augmentera de 10/20 % sur l'année surtout au printemps (mars à mai) et en hiver.

Impacts sur les milieux naturels

Les changements climatiques attendus au niveau des températures, des précipitations et des événements extrêmes vont fortement modifier les milieux naturels de l'Espace Mont-Blanc à l'horizon 2050, mais ces importantes modifications sont déjà à l'oeuvre. **L'enneigement dans les fonds de vallées et sur les versants sud jusqu'à 2000 m risque d'être réduit de 4 à 5 semaines par rapport à la période actuelle et de 2 à 3 semaines à 2500 m.** Le **recul des glaciers continuera à s'accélérer** pendant les prochaines décennies. 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.

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**, avec 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.

Eau

Le débit des cours d'eau va être plus fort en fin d'hiver et début de printemps en lien avec une augmentation des précipitations sous forme de pluie, et **au contraire plus faible en été** à cause de précipitations réduites et de la réduction de l'enneigement et de la surface glaciaire. L'intensité de ces modifications est dépendante des conditions spécifiques de chaque cours d'eau et bassin versant.

On s'attend à une **réduction significative (entre 15 et 40 %) du bilan hydrique estival (quantité d'eau disponible dans les sols) dès 2035 à toutes les tranches d'altitude**. Cette réduction va s'accroître un peu en 2050 et plus encore à la fin du siècle.

Agriculture

L'agriculture est un des secteurs économiques qui va être le plus directement impacté par le changement climatique : la hausse des températures et la modification des régimes de précipitations vont avoir des impacts variables sur la productivité animale et végétale. L'augmentation des températures pourrait constituer une opportunité en termes (i) de productivité primaire (végétale) en hausse potentiellement de 5% à 15%, (ii) de durée de saison plus longue permettant par exemple une fauche supplémentaire, (iii) ou de distribution géographique des cultures. Par exemple, les **viticulteurs pourraient implanter une plus large gamme de cépages, potentiellement sur des versants plus hauts**. La tendance est aussi à la **réduction du risque de gelées tardives***, un des aléas climatiques qui peut avoir un impact très fort sur l'agriculture de montagne, pour les trois cultures considérées dans ce rapport (pommiers, cerisiers, pâturages), et cette réduction sera plus forte autour de 700 m.

En revanche, ces bénéfices pourraient être contrebalancés par des risques accrus pour d'autres pratiques agricoles. Pour trois espèces d'insectes ravageurs considérées, on prévoit par exemple une **augmentation du nombre des générations par an dès 2035 dans les fonds de vallée**. Également dans les fonds de vallées, **le nombre de jours où les vaches laitières seront en stress à cause de la chaleur va augmenter, entraînant une baisse des rendements laitiers**.

Forêt et biodiversité

Certaines espèces d'arbres ne pouvant ni migrer ni s'adapter risquent de disparaître localement et être remplacées par de nouvelles espèces arrivant des étages inférieurs, notamment des feuillus. La **surface occupée par la forêt et la production de biomasse vont probablement augmenter grâce au réchauffement**. Cependant, les sécheresses auront un rôle déterminant dans la composition de la forêt en fragilisant les peuplements et en les rendant plus vulnérables aux sécheresses estivales, mais aussi aux attaques de parasites et de maladies et aux événements extrêmes.

Les espèces végétales et animales vont migrer vers les étages supérieurs vers et au-delà des limites supérieures de leur habitat actuel. La remontée des espèces de haute altitude va être contrainte par une diminution de la surface disponible et pourra se traduire par la disparition de certaines espèces spécialistes des environnements froids. Le prolongement de la saison sans neige va assouplir les contraintes climatiques agissant sur les plantes : la flore et la faune alpine dite "spécialiste" et adaptée à un enneigement long, risque d'être remplacée progressivement par des espèces plus généralistes et plus compétitrices.

Tourisme

Pour le futur plus proche (2035 et 2050) la viabilité des domaines skiables sous 2000 m d'altitude sera grandement fragilisée. Pour les domaines au dessus de 2000 m les risques varient en fonction de la configuration topographique et climatique (versants nord et versants sud) et d'autres conditions nécessaires à la mise en oeuvre des méthodes de gestion de la neige (disponibilité en eau, évolution technologique, soutenabilité socio-économique...). Du strict point de vue des températures, **les stratégies d'adaptation des stations de ski, basées sur la production de neige artificielle devraient être efficaces dans le futur proche (2035-2050) au dessus de 2000 m**, mais il est probable que cette option deviendra beaucoup moins valable à plus long-terme (fin du siècle).

L'allongement de la période estivale pourra également bénéficier au tourisme quatre saisons, surtout pendant les périodes actuellement considérées comme « hors-saison », au printemps et en automne : **une augmentation de près d'une semaine du nombre de journées aux conditions climatiques agréables ou excellentes* est prévue à toutes les altitudes pour les mois de juin et octobre dans le futur proche (2035-2050).**

Les activités pratiquées lors de la saison estivale (comme hivernale) seront affectées par le réchauffement des températures, le retrait des glaciers, la dégradation du permafrost, la baisse de la couverture nivale et la remontée de la végétation. **Toutes ces modifications auront des impacts sur les sentiers de montagne, notamment ceux d'accès aux refuges de haute montagne et les itinéraires des courses d'alpinisme.**

Risques naturels

L'EMB est un territoire particulièrement sensible aux dangers naturels liés à l'intensification du cycle de l'eau et aux modifications de la cryosphère (neige, glacier, permafrost) qui est un facteur de régulation de la stabilité des parois et des versants. La **dégradation du permafrost** peut réduire la stabilité des versants et impacter les infrastructures en haute montagne (remontées mécaniques, gares de téléphériques, routes, bâtiments, ...). **L'augmentation de l'instabilité des versants peut aussi être due au recul des glaciers**, qui entraîne la déstabilisation des moraines latérales et des parois rocheuses. Le risque d'effondrement des parties terminales des glaciers suspendus, ou qui se trouvent souvent dans des conditions de forte pente, sera aggravé dans les années à venir par le réchauffement. En plus en vue de la fonte accélérée des glaciers, le phénomène des **crues déclenchées par le vidage brutale de poches d'eau ou de lacs glaciaires** pourra s'accroître dans le futur. Concernant le **risque d'avalanche, une réduction du danger à basse altitude et une modification des caractéristiques des avalanches en haute altitude** est prévu. Le **risque de crues et d'inondation**, soit à cause des modifications de la cryosphère, soit à cause de l'augmentation dans la fréquence des événements de fortes précipitations est susceptible d'augmenter dans l'EMB dans les années à venir. Il est aussi très important de considérer que les dangers naturels dans un contexte de haute montagne comme l'EMB, puissent agir de façon synergique et additive, entraînant des effets en cascade. Toutes les stratégies d'adaptation aux risques dans l'EMB doivent tenir compte de ces possibilités d'interaction entre aléas.

1. Changements climatiques observés et futurs

1.1 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**. Le changement climatique actuel est dû à une forte hausse des émissions de gaz à effet de serre*, à laquelle s'ajoute de manière très marginale l'impact de cycles naturels. L'incertitude des modèles climatiques sur la hausse globale des températures futures naît surtout de **l'incertitude sur le niveau futur des émissions de gaz à effets de serre** par les sociétés humaines.

BOX 1 : des scénarios du GIEC (IPCC)* aux scénarios locaux

Les experts du GIEC (IPCC)* 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, « RCP2.6* », implique de fortes réductions d'émissions de GES. Au vu des émissions depuis 2013, ce scénario est très improbable. Le scénario intermédiaire est le « RCP4.5 ». Le scénario « RCP8.5 » 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 ces scénarios à l'échelle locale. Plus on « zoome » moins les résultats (« sorties ») des modèles sont fiables car font appel à des paramètres locaux et des phénomènes complexes. La montagne est en ce sens très difficile à modéliser, étant donné les effets de micro-relief, de versant, de saison, de couverture neigeuse etc.



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 1.2 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 connaît 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 EMB 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.

Les évolutions climatiques globales d'origine « anthropique » (humaine) entraînent 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 événements 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 chaîne d'impacts peut être schématisée ainsi (Figure 1.1) dans l'EMB:

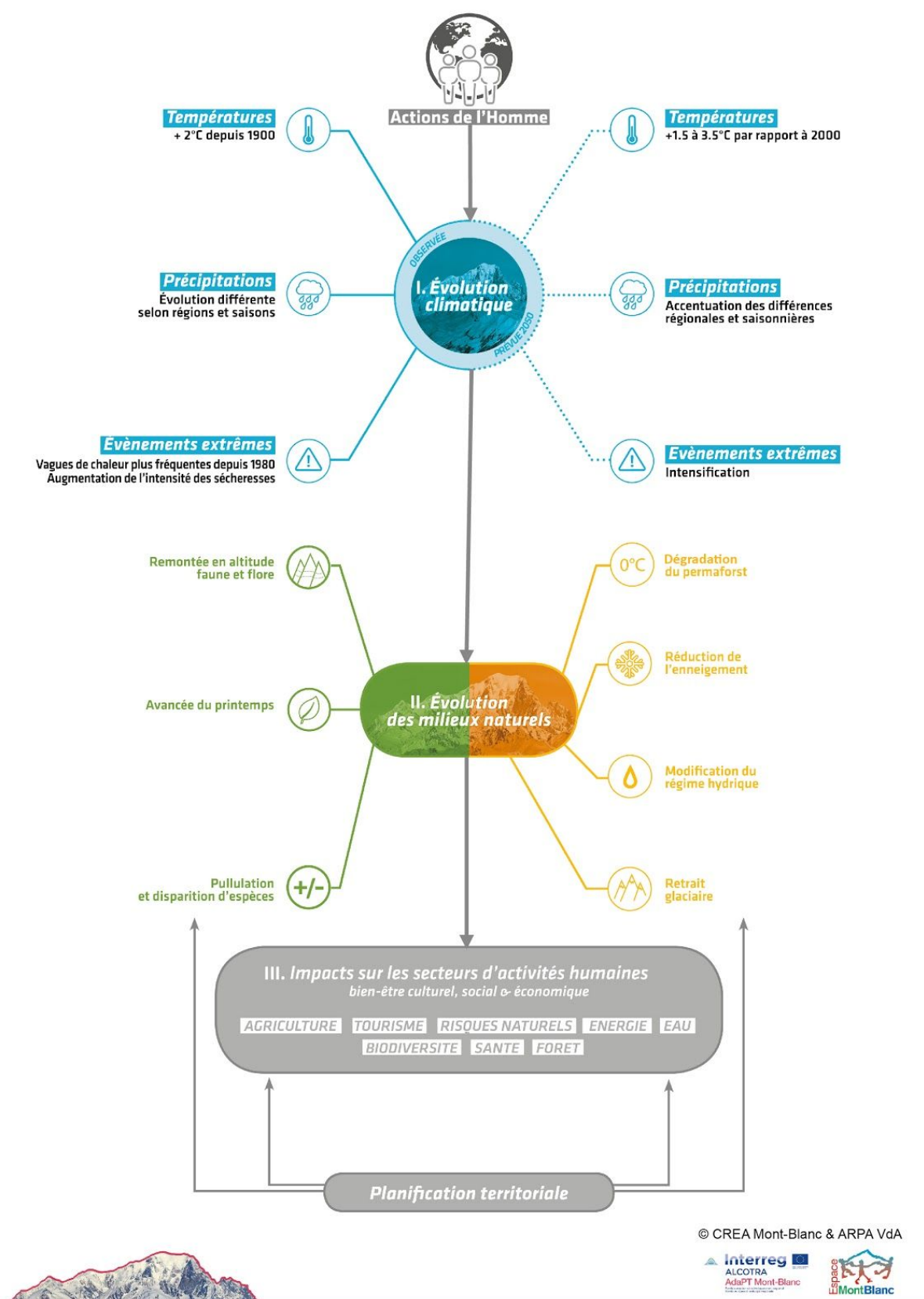


Figure 1.1. Schéma récapitulatif de l'enchaînement des conséquences depuis les paramètres climatiques jusqu'aux activités humaines. C'est cet enchaînement qui est repris dans ce rapport.

Objectifs du rapport: scénarios climatiques et secteurs socio-économiques

Vu que l'objectif de ce rapport sont i) l'analyse des scénarios de changements climatiques, ii) l'évaluation des impacts sur les milieux naturels et iii) sur les activités humaines, le processus a dû démarrer par une mise en commun d'informations entre acteurs et décideurs locaux et régionaux à l'échelle de l'EMB. Dans cet esprit, nous avons collaboré entre partenaires 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
- définir, dans le cadre d'une démarche participative très active (WP2 du projet Adapt Mont-Blanc) les secteurs socio-économiques prioritaires pour concentrer l'analyse d'impacts.

L'**objectif de ce rapport** est de représenter une synthèse pour les élus et les décideurs de l'EMB, à propos du changement climatique récent et prévu les impacts sur les milieux naturels du massif et les secteurs socio-économiques prioritaires. 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. Parmi les nombreuses activités humaines qui sont impactées par les changements climatiques, soit au niveau global soit à l'échelle de l'EMB, les secteurs suivants ont été priorisés par les acteurs locaux: ressources naturelles (eau, agriculture, forêt, biodiversité, ...), tourisme et risques naturels. Pour cette raison d'autres secteurs très importants comme, par exemple, la santé, l'énergie, le transport, ne sont pas inclus dans ce rapport.

BOX 2 : Météo ou climat ?

Pour étudier et appréhender les impacts du changement climatique, il est indispensable de distinguer entre la météo, qui fait référence à des événements 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 60 (indice climatique) n'empêche pas des années exceptionnelles comme 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 1.1. 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 les 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 (section 1) Nous terminons par une synthèse des principaux effets du changement climatique sur les milieux naturels de l'EMB (section 2) et sur les secteurs socio-économiques prioritaires (section 3).

Dans l'Annexe 1 sont présentés les détails méthodologiques et les sources des données utilisées. Les références aux articles ou rapports scientifiques cités sont à retrouver dans l'annexe 2, « Bibliographie ». La liste des acronymes utilisés se trouve dans l'Annexe 3.

1.2 Changements climatiques récents observés dans le massif du Mont-Blanc depuis 1900

À l'échelle globale, le réchauffement observé depuis le milieu du 19^{ème} 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 CO₂ (> 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 (CH2018*).

BOX 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 11000 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 entre 1300 et 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 météo continus et fiables que depuis le début du 20^{ème} siècle. On reconstitue les variations climatiques passées à partir d'indicateurs indirects (carottes de glace, cernes des arbres...).

Une étude récente (Neukom *et al.*, 2019) a démontré que les variations climatiques des derniers 2000 ans n'ont jamais été aussi intenses et homogènes à l'échelle de la Planète que le réchauffement des dernières décennies.

Températures

La hausse des températures est particulièrement marquée depuis la fin des années 1980, avec une **augmentation observée de 0,2 à 0,5° C par décennie** (Gobiet *et al.*, 2014, Météo-France, Météo-Suisse, Centro Funzionale Valle d'Aosta ; Figure 1.2). Cette hausse équivaut environ à la différence de température que l'on observe entre deux altitudes séparées par 100 m de dénivellée. A ce rythme, pour rester dans les mêmes conditions de température, il faudrait donc monter de 100m de dénivellée tous les 10 ans. En termes de saisonnalité, dans les Alpes le réchauffement mesuré est **particulièrement marqué au printemps et durant l'été**. En Vallée d'Aoste par exemple, on observe un réchauffement moyen de 0,58°C par décennie mais ce réchauffement est de 0,81 °C par décennie au printemps et 0,72 °C par décennie en été (Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta et ARPA VdA).

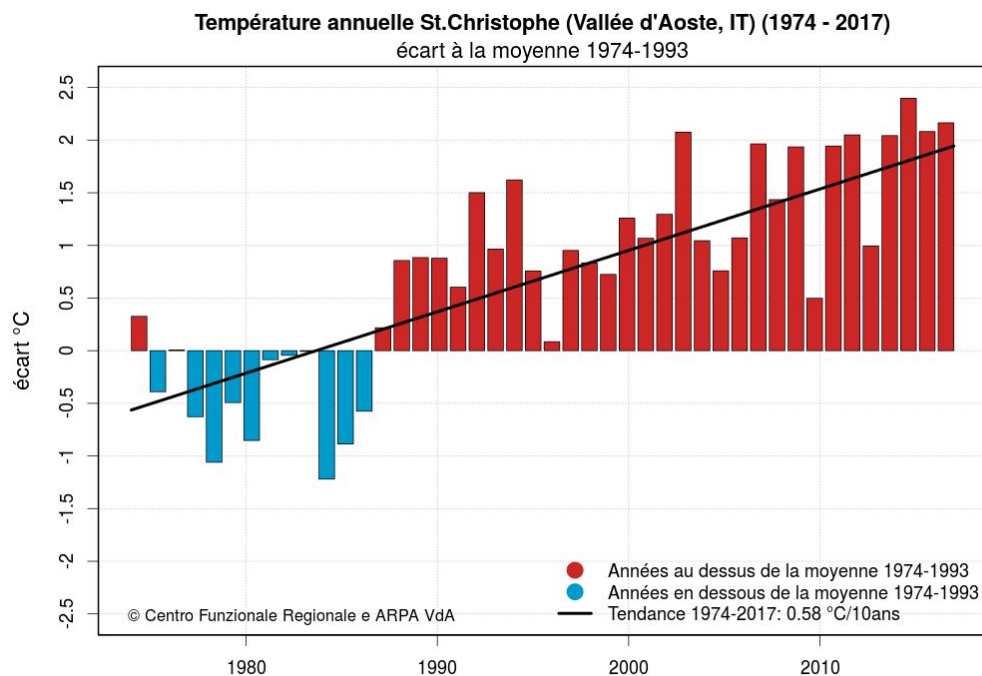


Figure 1.2. Augmentation des températures moyenne annuelles depuis 1974. Ce graphique représente l'écart des températures moyennes annuelles par rapport à la moyenne de la période 1974-1993 à Saint Christophe en Vallée d'Aoste. On note l'accélération de la hausse des températures à partir de la fin des années 80, ainsi que des moyennes annuelles variables (cf. "effet météo" en BOX 2).

Précipitations

Au niveau des Alpes, le régime des précipitations moyennes ne montre pas de tendance globale d'évolution au cours du 20^{ème} siècle mais un fort **contraste entre régions et saisons**. Pour les régions françaises et suisses de l'EMB et la Vallée d'Aoste, aucun changement significatif dans les précipitations ne peut être observé depuis 1864 (Météo-France, Météo-Suisse, Centro Funzionale Valle d'Aosta - Figure 1.3). On constate pourtant une forte variabilité dans la quantité des précipitations d'une année à l'autre.

BOX 4 : Les saisons en climatologie

En climatologie, les saisons ne sont pas les saisons calendaires. Hiver : décembre/janvier/ février, **DJF**; Printemps : mars/avril/mai, **MAM**; Été : juin/juillet/août, **JJA**; Automne : septembre/octobre/novembre, **SON**

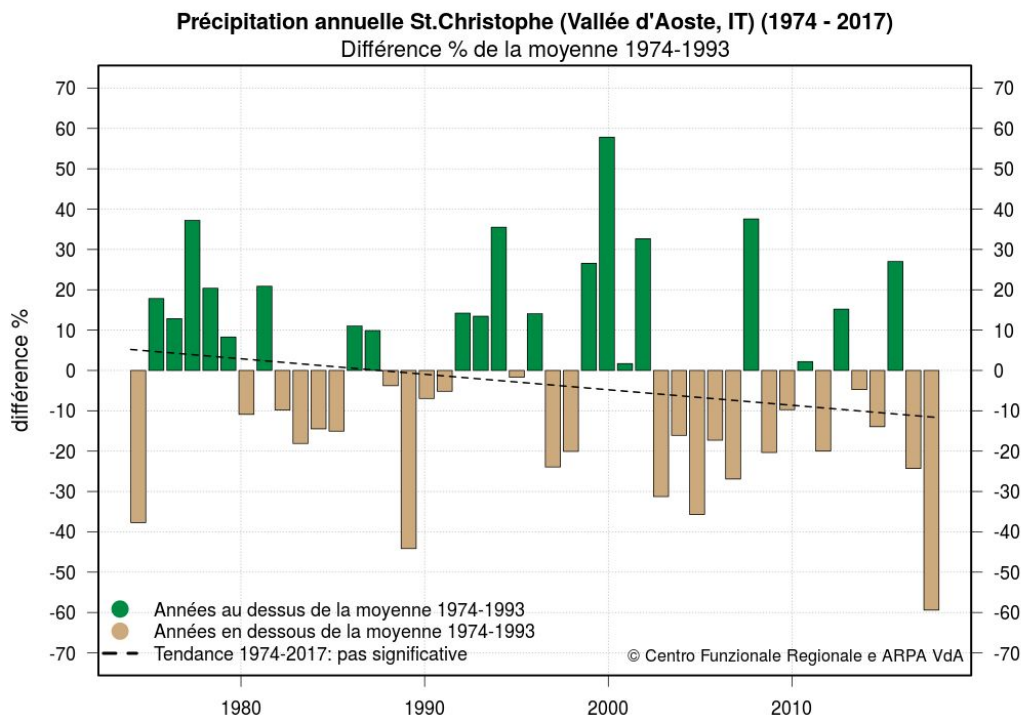


Figure 1.3. Evolution des précipitations annuelles depuis 1974. Ce graphique représente l'écart des précipitations moyennes annuelles par rapport à la moyenne de la période 1974-1993 à Saint Christophe en Vallée d'Aoste. On note une absence de tendance significative malgré une légère baisse observée pendant les dernières années, ainsi qu'une grande variabilité entre les années.

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 **événements 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 événements 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 augmenté depuis les années 1970. Ainsi, le réchauffement dans l'EMB s'est traduit par une baisse du nombre de jours de gel* (nombre de jours par an avec des températures minimales inférieures à 0°C) depuis les années 1970 de l'ordre de 6,5 jours par décennie à une altitude de 600 m (Figure 1.4). En revanche, au printemps, la hausse des températures a été accompagnée par une exposition plus forte aux événements 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). Ce phénomène se produit quand la végétation (naturelle ou cultivée) démarre plus tôt grâce à des températures printanières élevées. Cette stratégie risquée augmente l'exposition des plantes aux événements de froid qui sont fréquents tôt en saison (Février-Avril).

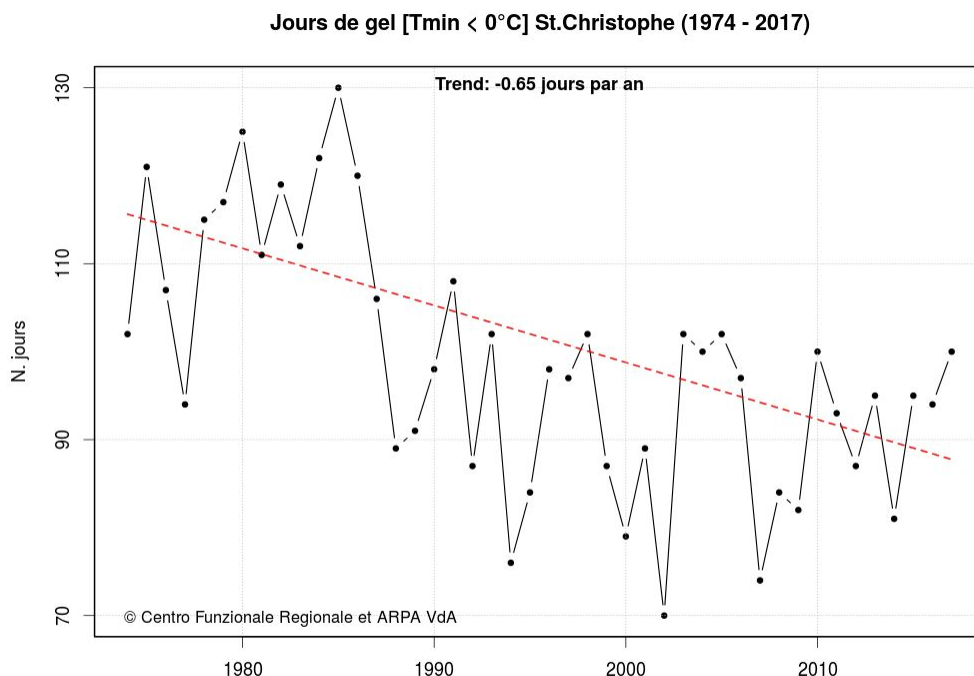


Figure 1.4. Évolution du nombre de jours de gel* (température minimale journalière inférieure à $0^{\circ}C$) par an à Saint Christophe en Vallée d'Aoste entre 1974 et 2017. On note une réduction très forte du nombre des jours de gel de 6,5 jours par décennie.

Dans l'EMB, **on observe une augmentation des canicules** (jours « tropicaux », nombre de jours par an avec des températures maximales supérieures à $30^{\circ}C$). En Vallée d'Aoste, par exemple cette augmentation a été de 7,3 jours par décennie (Figure 1.5). 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.

Un événement 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 19^{ème} siècle (Meteo Suisse). 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 mais une forte augmentation de la variabilité et de la fréquence dans les années plus récentes (Figure 1.6).

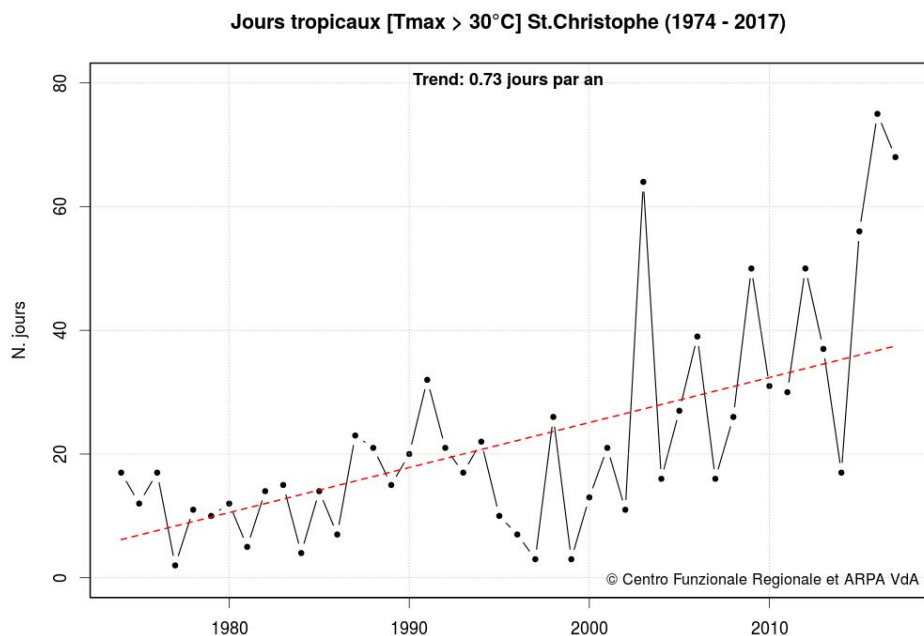


Figure 1.5. Évolution du nombre de jours « tropicaux » (température maximale journalière supérieure à 30 °C) par an à Saint Christophe en Vallée d'Aoste entre 1974 et 2017. On note un fort contraste entre les années, avec par exemple les canicules de 2003, 2016 et 2017 particulièrement marquées et une forte tendance à l'augmentation du nombre de jours tropicaux* (7,3 jours par décennie).

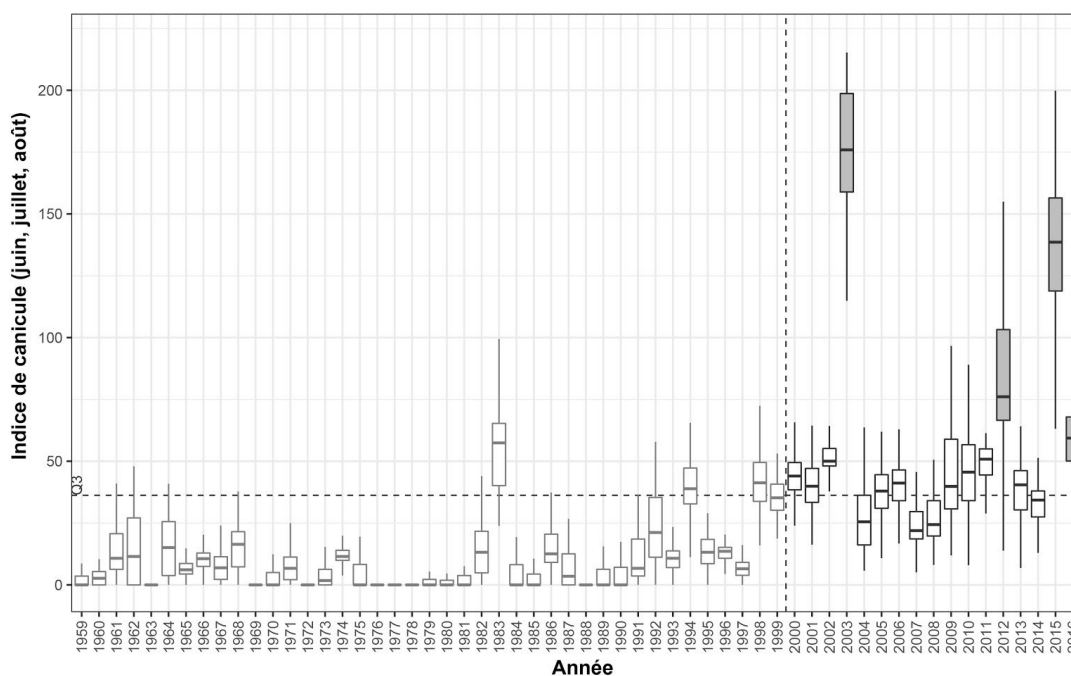


Figure 1.6. Évolution de l'indice de canicule dans les alpages des Alpes françaises (Corona-Lozada et al., 2019). Source : LECA*

1.3 Projections climatiques dans le massif du Mont-Blanc pour les futures décennies

Les scénarios climatiques 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, accompagnée par une redistribution saisonnière des précipitations. 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 scénarios climatiques réalisés par MétéoSuisse (CH2018)
- 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.

Les trois sources de données font que les modèles utilisés ne sont pas les mêmes, mais leurs résultats restent comparables. Pour rappel, pour chaque modèle climatique, trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (cf. BOX 1) sont considérés: un scénario plus optimiste « RCP 2.6 » qui donne une très forte réduction des émissions d'ici la fin du siècle, un intermédiaire « RCP 4.5 » et un scénario plus pessimiste « RCP 8.5 » basé sur une poursuite de nos émissions actuelles. Au niveau global, à la date d'écriture de ce rapport, les émissions de gaz à effets de serre sont en hausse de 2% environ pour 2016 et 2017 et projeté en hausse de nouveau en 2018 (Global Carbon Budget 2018, Le Quéré et al., 2018). Ce niveau d'émissions nous place dans une trajectoire d'augmentation des températures au dessus des 2°C des engagements de l'Accord de Paris. 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.

BOX 5 : 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.

Températures

Les températures moyennes annuelles poursuivent leur hausse, **entre +1°C et +3°C en 2035 suivant les scénarios d'émissions retenus**, par rapport à la période 1980-2010. Au fil des décennies, les différents scénarios sont de plus en plus divergents avec une augmentation des températures encore plus marquée dans le scénario pessimiste : cette divergence s'explique par l'inertie du climat par rapport à l'augmentation de la concentration des 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 (au delà de 2050) par rapport au scénario RCP 8.5 dans lequel nos émissions continuent d'augmenter dans le futur proche.

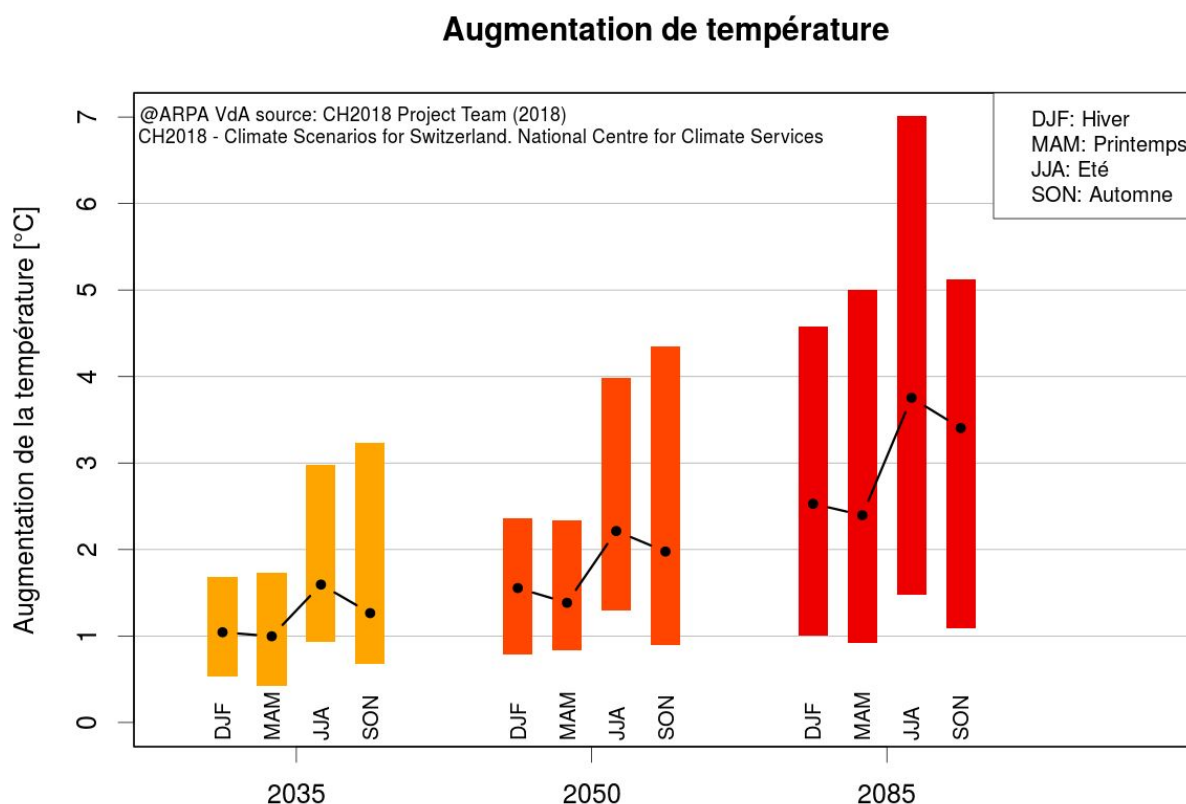


Figure 1.7. Variation de la température moyenne par saison pour l'EMB pour trois périodes futures (2035, 2050 et 2085). Ces chiffres sont la synthèse de divers scénarios (RCP2.6, 4.5 et 8.5) et modèles climatiques. Les barres représentent la fourchette d'incertitude, qui augmente au fil des décennies (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.

Les températures continueront à augmenter à toutes les saisons, avec **une hausse attendue plus marquée en été et en automne** (Figure 1.7), quel que soit l'horizon temporel. Dès 2050, dans le scénario intermédiaire (RCP 4.5) la hausse des températures sera nettement plus importante dans l'EMB que l'objectif fixé par les accords de Paris en 2015. On n'attend pas de différences marquées dans l'augmentation des températures le long du gradient d'altitude en hiver, tandis qu'en été l'augmentation sera plus forte en moyenne et haute montagne. (Figure 1.8).

BOX 6 : fonds de vallée / moyenne montagne / haute montagne

L'analyse des scénarios et des impacts est présentée pour différentes tranches d'altitude de l'EMB: fonds de vallée (400-1000 m), moyenne montagne (1000-2000 m) et haute montagne (> 2400 m).

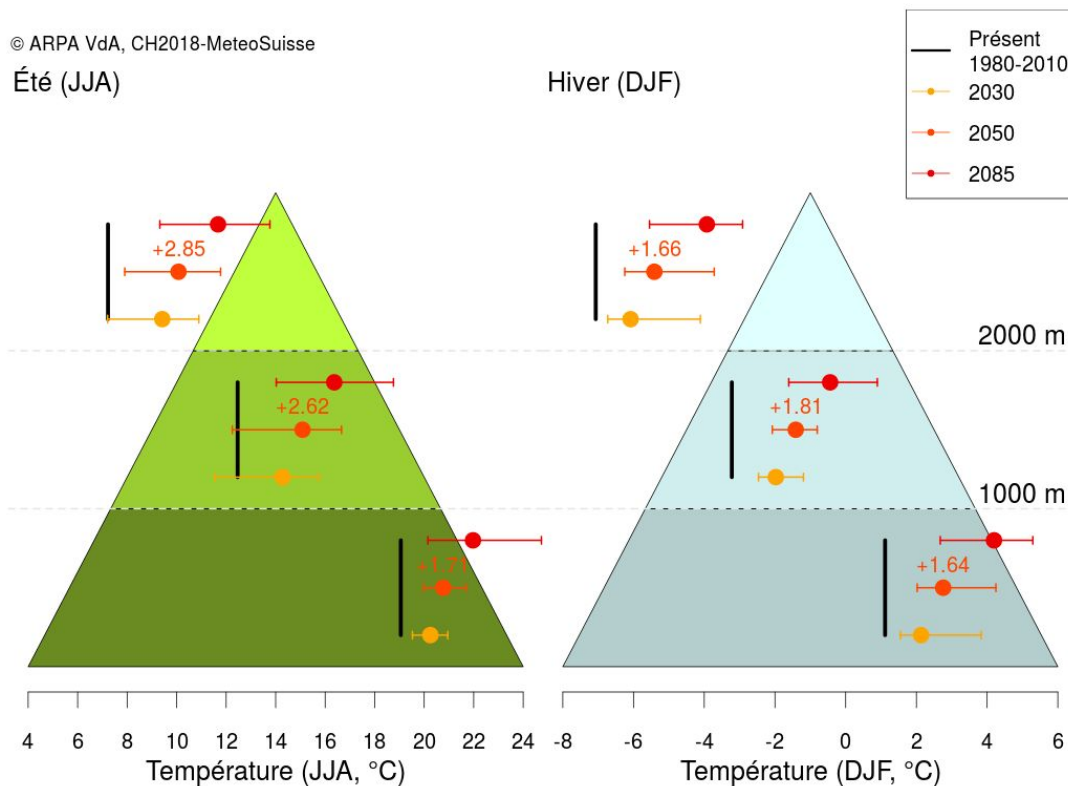


Figure 1.8. Variation des températures moyennes hivernales et estivales pour l'EMB pour trois périodes futures (2035, 2050 et 2085) et pour trois bandes altitudinales (fonds de vallée, moyenne montagne, et haute montagne). Les points représentent la moyenne des trois scénarios d'émissions. Les barres représentent la fourchette d'incertitude, tous scénarios et tous modèles confondus. Les lignes noires verticales représentent les valeurs moyens de la période 1980-2010.

En été, **l'isotherme* 0°C** remonte de 300 m de dénivelée, passant de 3 800 m aujourd'hui pendant la saison estivale à 4 100 m en 2050 (Figure 1.9). Cette remontée de l'isotherme 0°C correspond à un réchauffement en été de plus 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 deux scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5), 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.

TEMPERATURE MOYENNE ESTIVALE - RCP 4.5

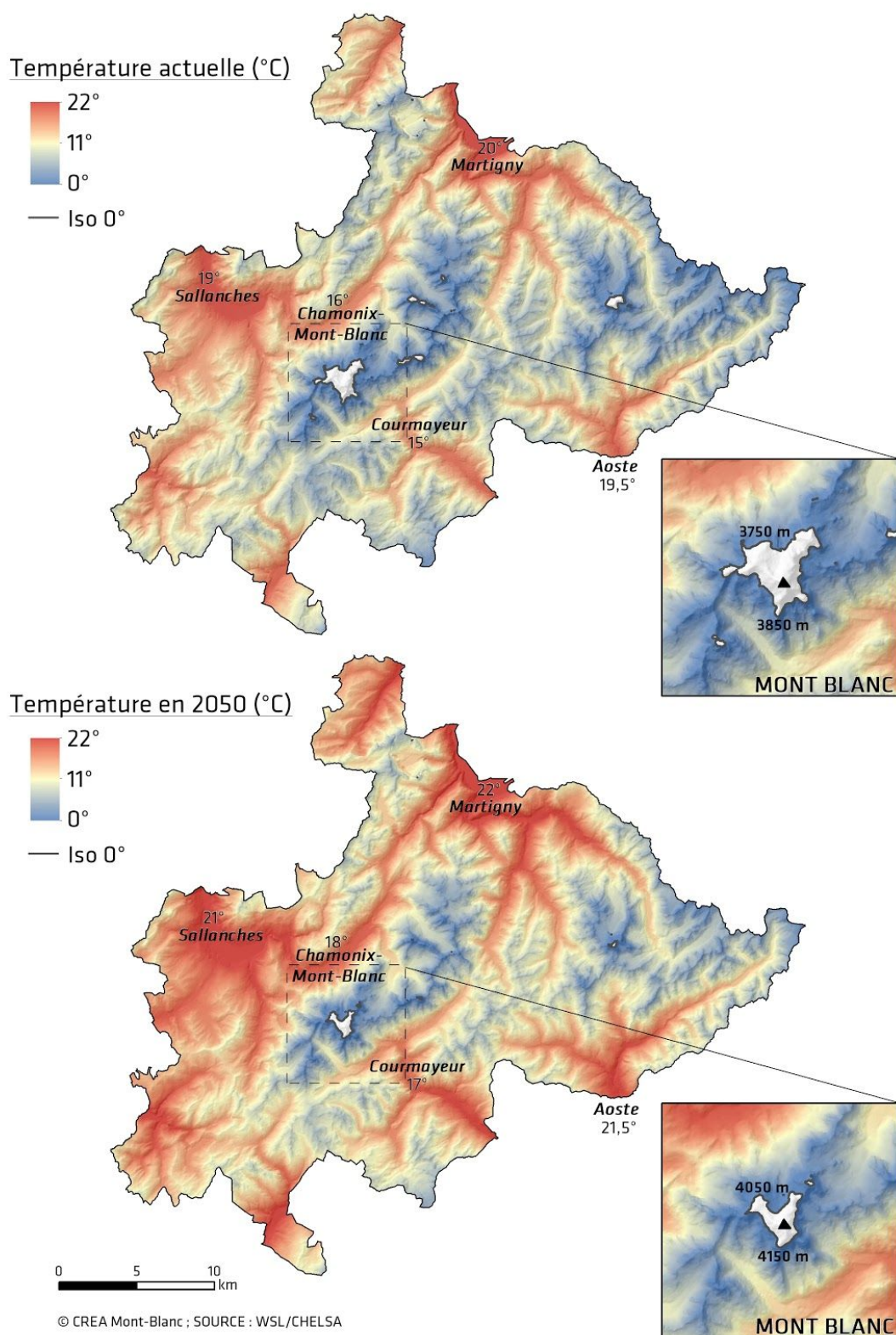


Figure 1.9. Les températures estivales moyennes aujourd'hui et en 2050 dans l'Espace Mont-Blanc, selon le scénario médian RCP 4.5. On note que seulement le sommet du Mont-Blanc et quelques hauts sommets autour (Grandes Jorasses, Grand Combin) restent au-dessus de la limite du dégel.

Précipitations

Concernant les précipitations annuelles, **l'incertitude reste forte** (de -10 à +10 %) et les scénarios prévoient que **la précipitation cumulative annuelle ne changera pas**. Néanmoins, on s'attend à une **augmentation des précipitations hivernales** (+15/20 %) avec en particulier une augmentation des précipitations pluvieuses et une réduction des précipitations neigeuses au dessous de 2300/2500 m. En même temps on s'attend aussi une **baisse des précipitations estivales de l'ordre de -10/-20 % dès 2035**. Pour les autres périodes de l'année l'incertitude est forte (Figure 1.10).

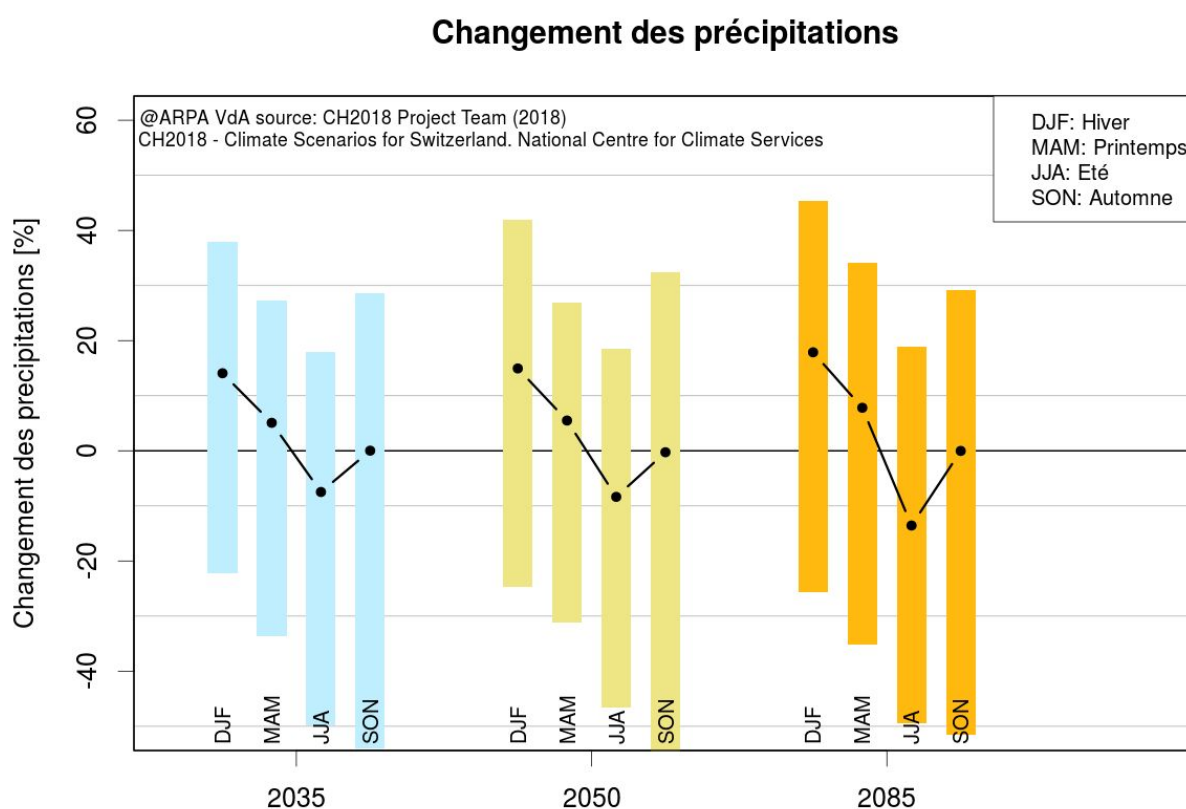


Figure 1.10. Variation en pourcentage des précipitations saisonnières pour l'EMB pour trois dates à venir (2035, 2060 et 2085). Les barres représentent la fourchette d'incertitude, tous scénarios et modèles confondus.

Croisé avec la hausse importante des températures estivales, on peut s'attendre à un risque de canicule et de sécheresse plus important dans les décennies à venir. Il est important de noter que la baisse des précipitations est plus importante dans la partie ouest de l'EMB (Figure 1.11), en valeur absolue et non en pourcentage car cette région reçoit plus de précipitations actuellement. Si la variation des précipitations estivales semble relativement constante en fonction de l'altitude (Figure 1.12), les modèles prédisent une augmentation des précipitations hivernales plus forte en haute montagne.

VARIATION DES PRÉCIPITATIONS ESTIVALES (actuel à 2050 - RCP 4.5)

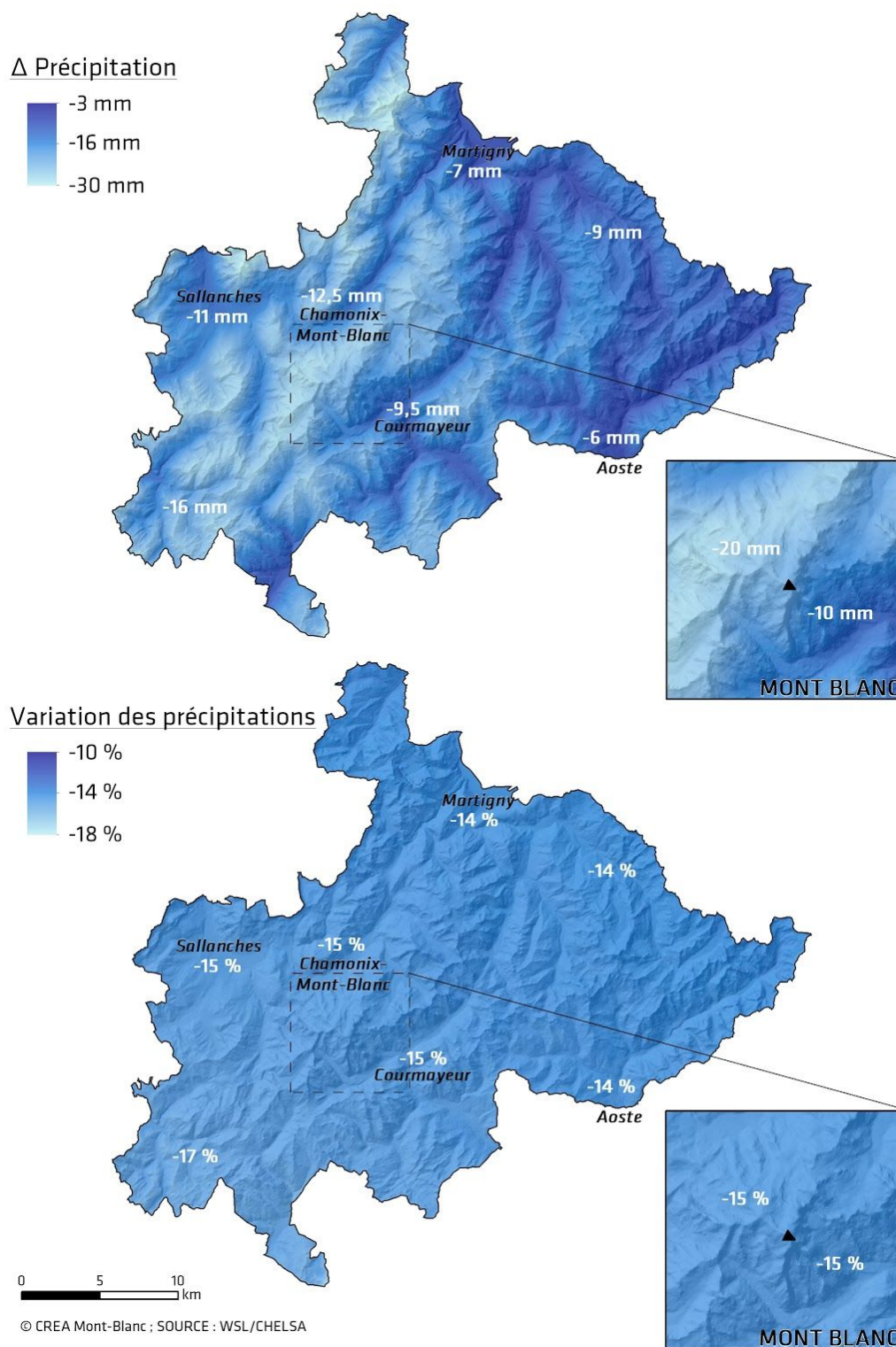


Figure 1.11. Variation des précipitations en été entre aujourd'hui et en 2050 dans l'Espace Mont-Blanc, selon le scénario médian RCP 4.5. On note une réduction d'environ 15% des précipitations sur l'ensemble du territoire, qui augmente à 18% dans le cas du scénario RCP 8.5.

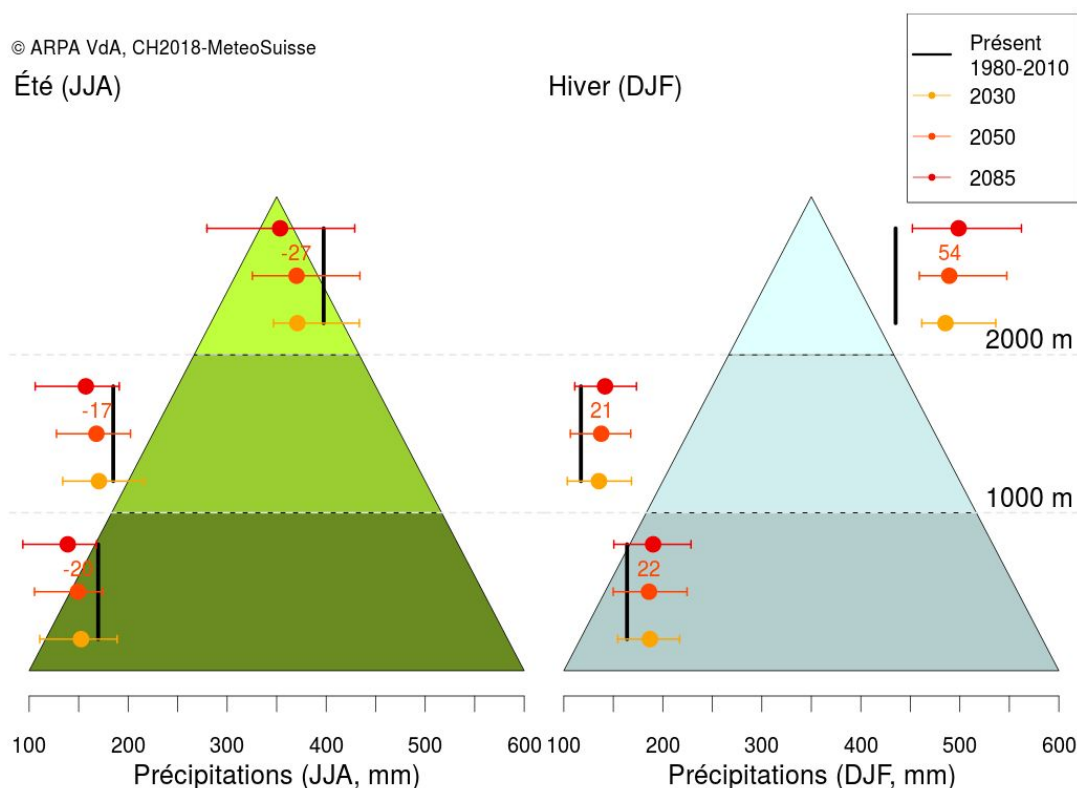


Figure 1.12. Variation des précipitations moyennes hivernales et estivales pour l'EMB pour trois périodes futures (2035, 2060 et 2085) et pour trois bandes altitudinales (fonds de vallée, moyenne montagne, et haute montagne). Les points représentent la moyenne des 3 scénarios d'émissions. Les barres représentent la fourchette d'incertitude, tous scénarios et tous modèles confondus. Les lignes noires verticales représentent les valeurs moyennes de la période 1980-2010.

Jours de gel et de glace

En parallèle de l'augmentation des températures et d'une redistribution saisonnière de la fréquence et de l'intensité des précipitations, tous les scénarios climatiques prévoient aussi une hausse de l'occurrence des **événements extrêmes**. Dans l'EMB, en moyenne on s'attend à une diminution importante du nombre de **jours de gel** (nombre de jours par an avec température minimale < 0°C) de l'ordre de -20 à -80 jours par an d'ici 2085 (Figure 1.13) avec un impact différent selon l'altitude considérée. **La réduction la plus marquée est prévue en fond de vallée**, tous scénarios et horizons temporels confondus. Dans cette tranche d'altitude on s'attend à une réduction de 15 % dès 2035 (environ 15 jours) jusqu'à 30 % pour la fin du siècle. Pour les autres altitudes, on s'attend en 2035 à une réduction d'environ 10 % du nombre de jours de gel, et jusqu'à 16-18 % pour la fin du siècle. L'incertitude liée aux différents scénarios devient de plus en plus importante pour toutes les altitudes vers la fin du siècle: en 2085 le scénario plus pessimiste prévoit une réduction des jours de gel en moyenne et haute montagne de l'ordre de 30 à 40 %.

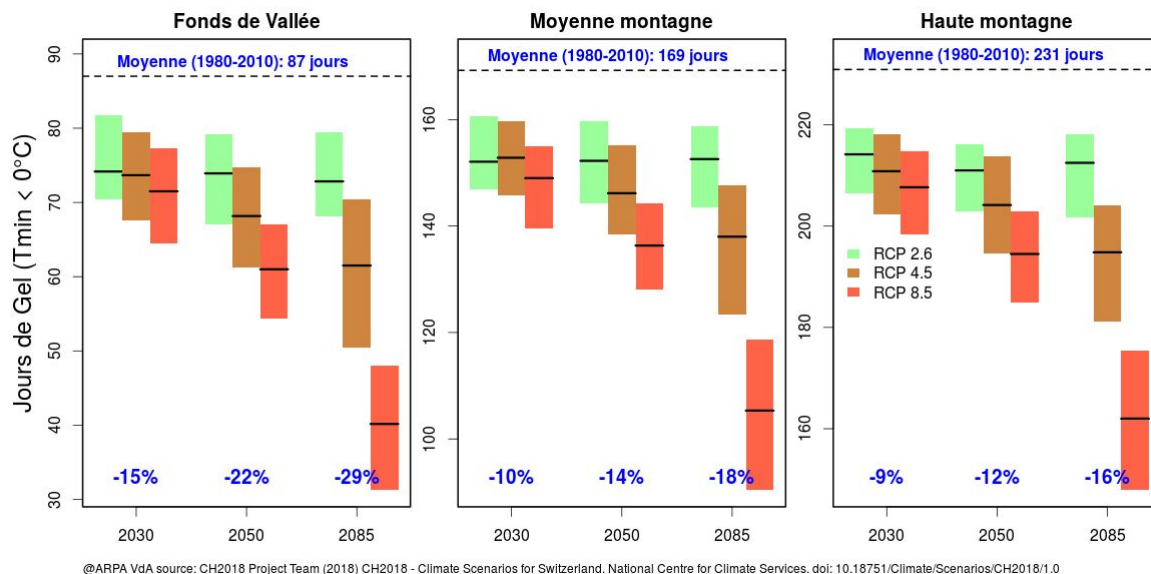


Figure 1.13. Variation du nombre annuel de jours de gel pour trois tranches d'altitude. La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés.

Le nombre de **jours de glace** (nombre de jours par an avec une température maximale < 0°C) est un paramètre également très important pour les milieux de haute altitude, notamment pour la conservation du permafrost, des glaciers et de la neige. Dans la période 1980-2010, entre 2300 m et 2700 m, on observe plus de quatre mois de jours de glace par an et presque deux mois en moyenne montagne. **En haute montagne les jours de glace risquent de diminuer de plus d'un mois en 2050, et jusqu'à deux mois pour le scénario pessimiste en fin de siècle, c'est-à-dire une réduction de 50% par rapport à la période actuelle (Figure 1.14). Dans le futur proche (2035) une réduction de l'ordre de 15-20 % est déjà attendue à la fois en moyenne et en haute montagne.** Cette réduction pourra entraîner des effets importants sur la stabilité des parois rocheuses et sur les dynamiques de risques naturels et sur la pratique de l'alpinisme en général (voir section 3.6, Risques Naturels).

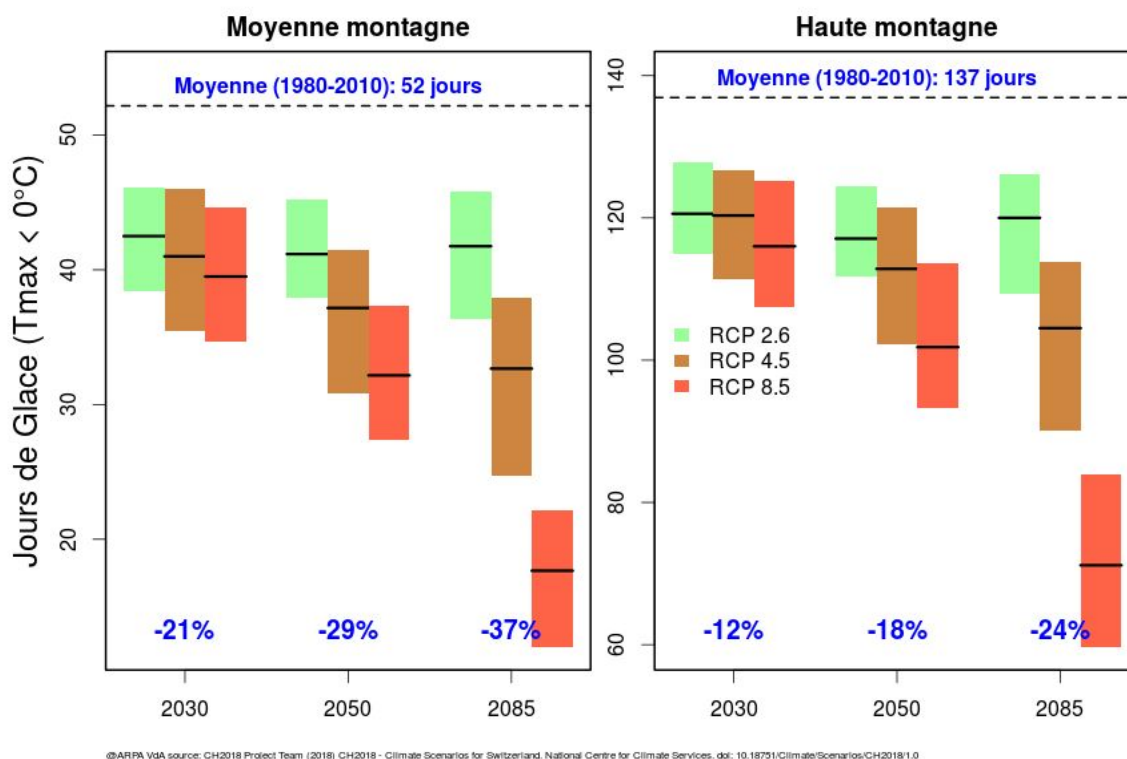


Figure 1.14. Variation du nombre annuel de jours de glace pour la moyenne et la haute montagne. La couleur des barres représente les différents scénarios. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés.

Événements extrêmes de canicules

D'ici 2035, dans les fonds de vallée et en moyenne montagne on s'attend à environ 20 jours d'été supplémentaires par an (nombre de jours par an avec température maximale > 25°C - (Figure 1.15). En moyenne montagne en particulier, où le nombre de jours d'été est à présent de 5 jours, on arrivera à environ 15-20 jours dès 2035. Le nombre de jours d'été pourrait attendre 3 mois d'ici 2050 en fond de vallée et à un mois et demi en moyenne montagne. Pour la fin du siècle, l'incertitude des scénarios est très forte et les valeurs varient entre 80 et 140 jours pour les fonds de vallée, et entre 20 et 80 jours en moyenne montagne.

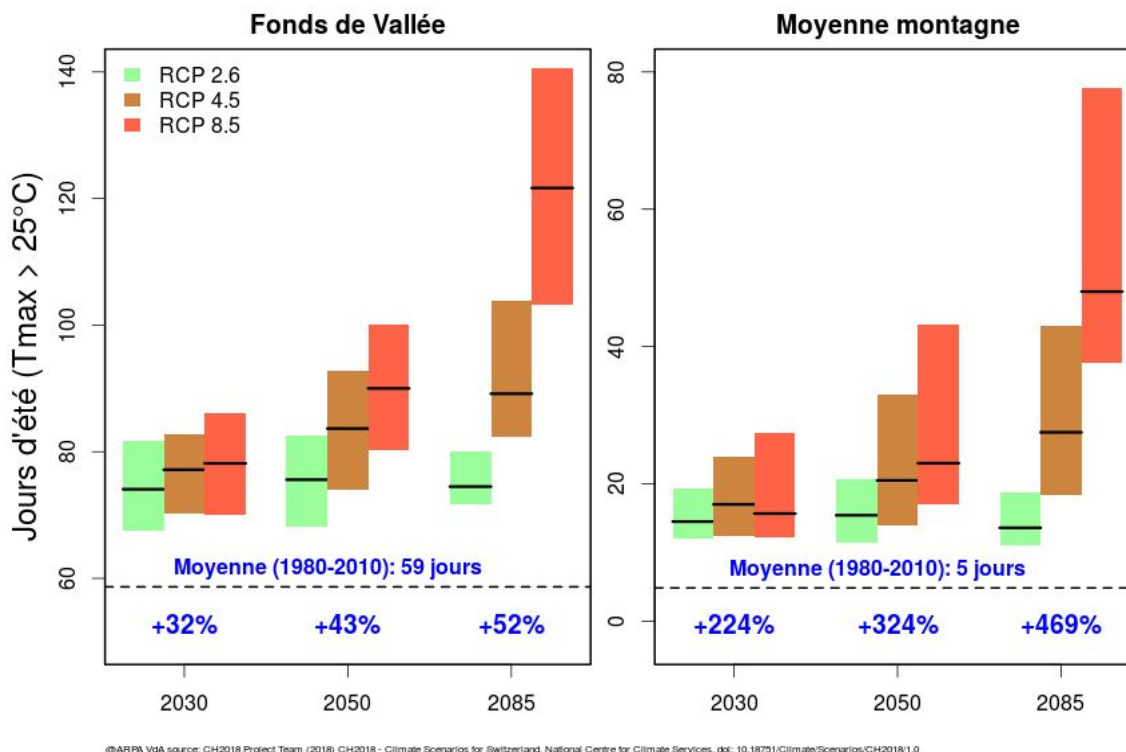


Figure 1.15. Variation du nombre annuel de jours d'été en fond de vallée et en moyenne montagne. La couleur des barres représente les différents scénarios. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés.

L'augmentation des jours d'été, se traduira aussi par une augmentation importante des **jours caniculaires** (nombre de jours par an avec température maximale > 32°C). **En fond de vallée** (Figure 1.16), **on s'attend à de passer de 2 jours caniculaires par an actuellement à 6-10 jours en 2035 et 15-20 en 2050**. Pour la fin du siècle, l'incertitude des scénarios est très forte et les prédictions varient entre 10 et 50 jours.

Si pendant la nuit la température reste trop élevée (i.e. **nuits tropicales**, nombre de jours par an avec température minimale > 20°C) il est plus difficile pour le corps humain de se refroidir, en particulier pour les personnes âgées ou malades. Par conséquent, une augmentation des nuits tropicales (Figure 1.17) peut entraîner des impacts négatifs sur la santé et le bien-être. D'ici 2035, l'augmentation prévue est faible (moins de 5 nuits) mais en 2050 on s'attend à avoir entre 4 et 10 nuits tropicales par an dans les fonds de vallée. A la fin du siècle l'incertitude augmente, mais dans les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 on s'attend à 8 à 35 nuits tropicales par an.

Ces indices soulignent une hausse dans la fréquence (quantité de jours par an) des journées dans lesquelles différents seuils de température seront dépassés. Il est très important aussi d'évaluer la durée de ces vagues de chaleur, à travers un indice de **durée caniculaire** (au moins 6 jours caniculaires consécutifs). D'ici 2035, le nombre de jours caniculaires augmente (Figure 1.16), mais ces jours ne seront en général pas consécutifs, la durée caniculaire restant donc nulle en moyenne (Figure 1.18). Pour 2050, on s'attend à une augmentation dans la durée des vagues de chaleur d'entre 5 et 10 jours, et pour la fin du siècle les scénarios prévoient des vagues de chaleur de 5 à 20 jours. **En résumé, les vagues de chaleur devraient devenir plus fréquentes, plus intenses et durer plus longtemps à l'échelle de l'EMB** comme dans le reste de l'Europe.

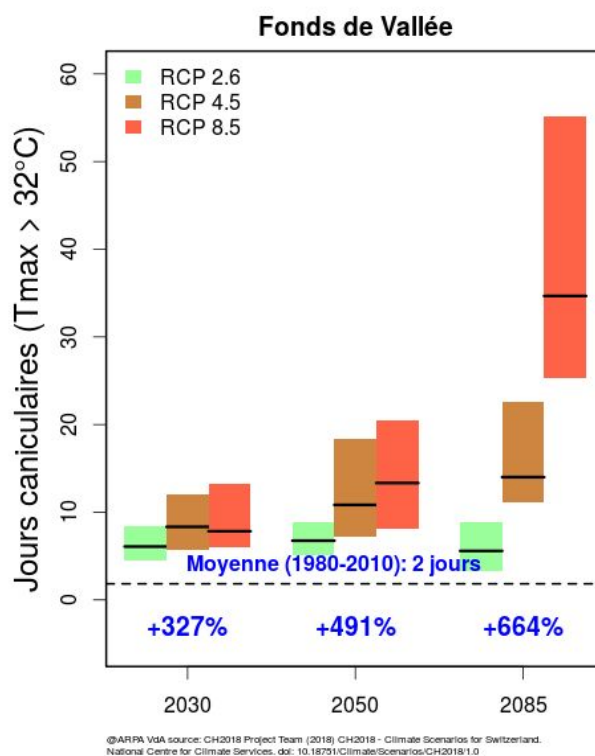


Figure 1.16. Variation du nombre annuel de jours caniculaires en fond de vallée. Le seuil utilisé pour définir les jours caniculaires (32°C) représente le 95^{ème} percentile de la distribution de température maximale observé à l'échelle de l'EMB dans la période historique 1980-2010. La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10^{ème} et 90^{ème} percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés.

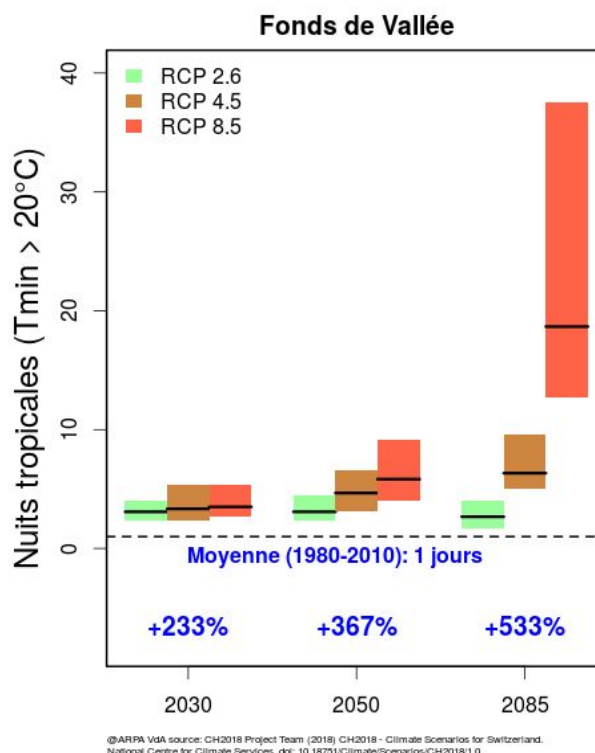


Figure 1.17. Variation du nombre annuel de nuits tropicales en fond de vallée. La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10^{ème} et 90^{ème} percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés.

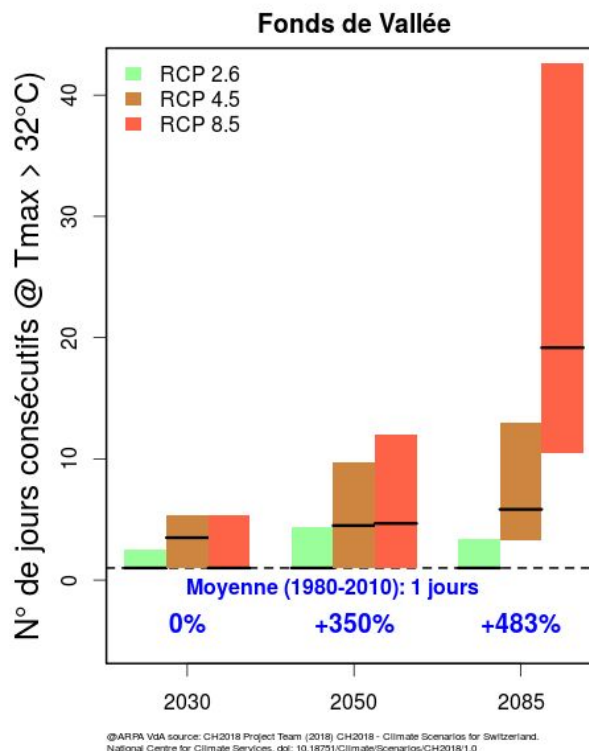


Figure 1.18. Variation de la durée caniculaire. La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés.

Évènements extrêmes de sécheresses

Au vu de l'évolution des précipitations et des températures nous pouvons nous attendre aussi à des évènements de sécheresse plus fréquents et sévères dans les futures décennies, surtout pendant l'été et l'automne. Les indices utilisés pour décrire les scénarios de sécheresse sont :

- la durée de sécheresse, soit le nombre de jours consécutifs sans pluie (nombre maximal de jours consécutifs avec précipitations < 1mm)
- le bilan estival, plus global, entre précipitations (P) et évapotranspiration potentielle (ETP): P-ETP. Un bilan négatif indique un manque d'eau potentiel tandis qu'un bilan positif indique un surplus d'eau.

Ces indices sont plus incertains que les indices de gel et canicule car les scénarios de précipitations sont eux-mêmes plus incertains que les scénarios de températures.

Concernant la durée de sécheresse, on prévoit une augmentation négligeable d'ici 2035 et toujours faible (2-10 %) en 2050, et ce pour tous les étages altitudinaux. A la fin du siècle, l'évolution dépend fortement du scénario climatique (Figure 1.19).

En revanche, alors que pour la période 1980-2010, on observe un bilan hydrique (P-ETP) estival négatif dans les fonds de vallée et en moyenne montagne, et positif en haute montagne (Figure 1.20), on s'attend à une **réduction significative (entre -14/38 %) du bilan hydrique estival (P-ETP) dès 2035 à**

toutes les tranches d'altitude. Cette réduction va s'accroître un peu en 2050 (-17/-40 %) et plus encore à la fin du siècle (-22/-60 %). **L'impact le plus fort est attendu en moyenne montagne,** et le scénario le plus pessimiste prévoit un bilan négatif même en haute montagne à la fin du siècle.

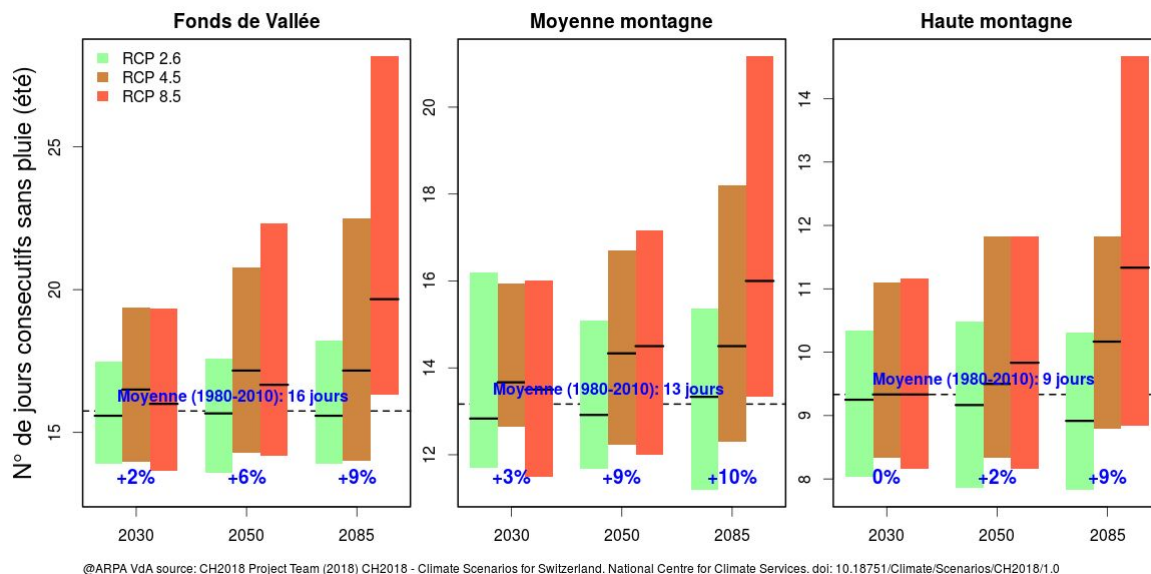


Figure 1.19. Variation de la durée de jours consécutifs sans pluie. La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés.

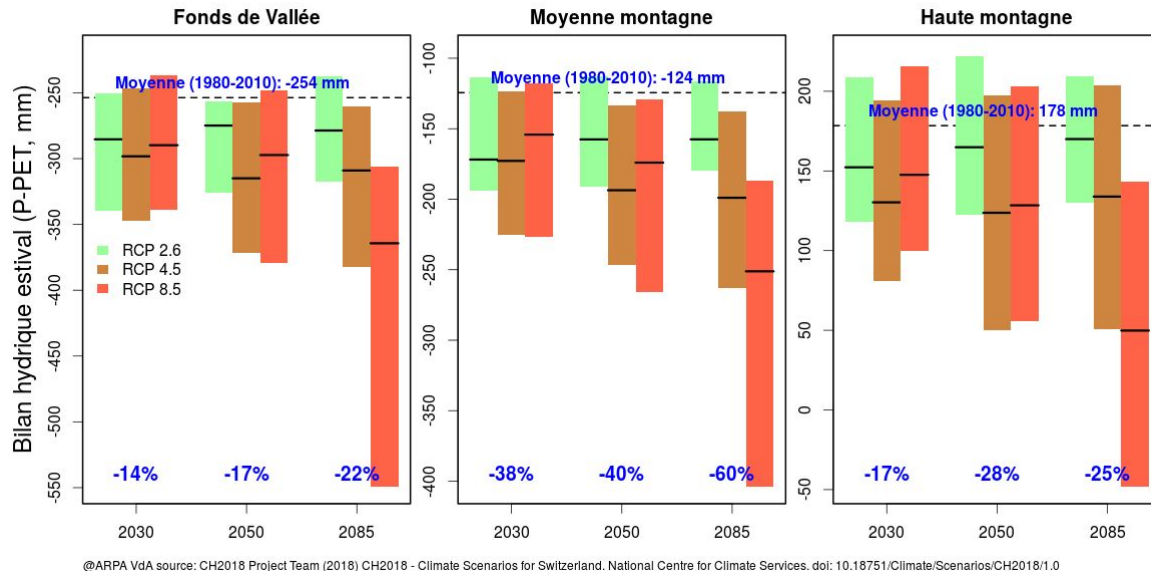


Figure 1.20. Variation du bilan entre précipitations et évapotranspiration potentielle (P-ETP) en été. La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés.

Événements extrêmes de précipitations fortes

Dans un contexte climatique général de température et d'humidité de l'air plus élevées, une augmentation de l'intensité et de la fréquence de précipitations intenses est attendue en Europe et dans

les Alpes (Gobiet et al., 2014, CH2018). À l'échelle de l'EMB, les scénarios climatiques prévoient une augmentation à la fois :

- de **l'intensité des précipitations** (cumul de précipitations (mm) les jours de précipitations supérieures à 1 mm divisé par le nombre de jours de précipitations > 1 mm)
- du **cumul annuel de précipitations dans les jours de précipitations extrêmes** (cumul annuel de précipitations (mm) dans les jours de précipitations supérieures à 20 mm, définis comme jours de précipitations extrêmes).

Même si l'incertitude des modèles n'est pas négligeable, les scénarios prévoient une faible augmentation de l'intensité des précipitations (Figure 1.21), entre 2 et 6 % à tous les étages altitudinaux.

Mais **la quantité de précipitations qui tombera pendant les événements extrêmes augmentera de 10 à 20 %** (Figure 1.22) sur l'année surtout au printemps et en hiver. **Au printemps, les augmentations les plus fortes sont attendues en fond de vallée : +17 % en 2035 et +33 % à la fin du siècle. En hiver, l'incertitude des modèles augmente mais on s'attend à une hausse importante déjà en 2035**, comprise entre +13 et +35 % à toutes les tranches d'altitude.

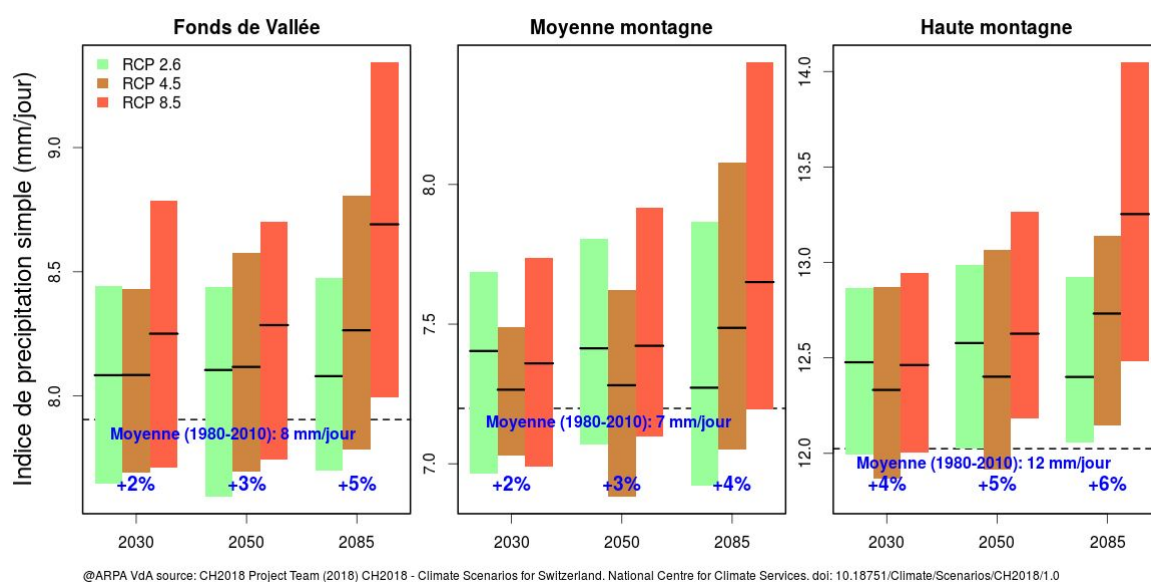


Figure 1.21. Variation de l'intensité des précipitations. La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés.

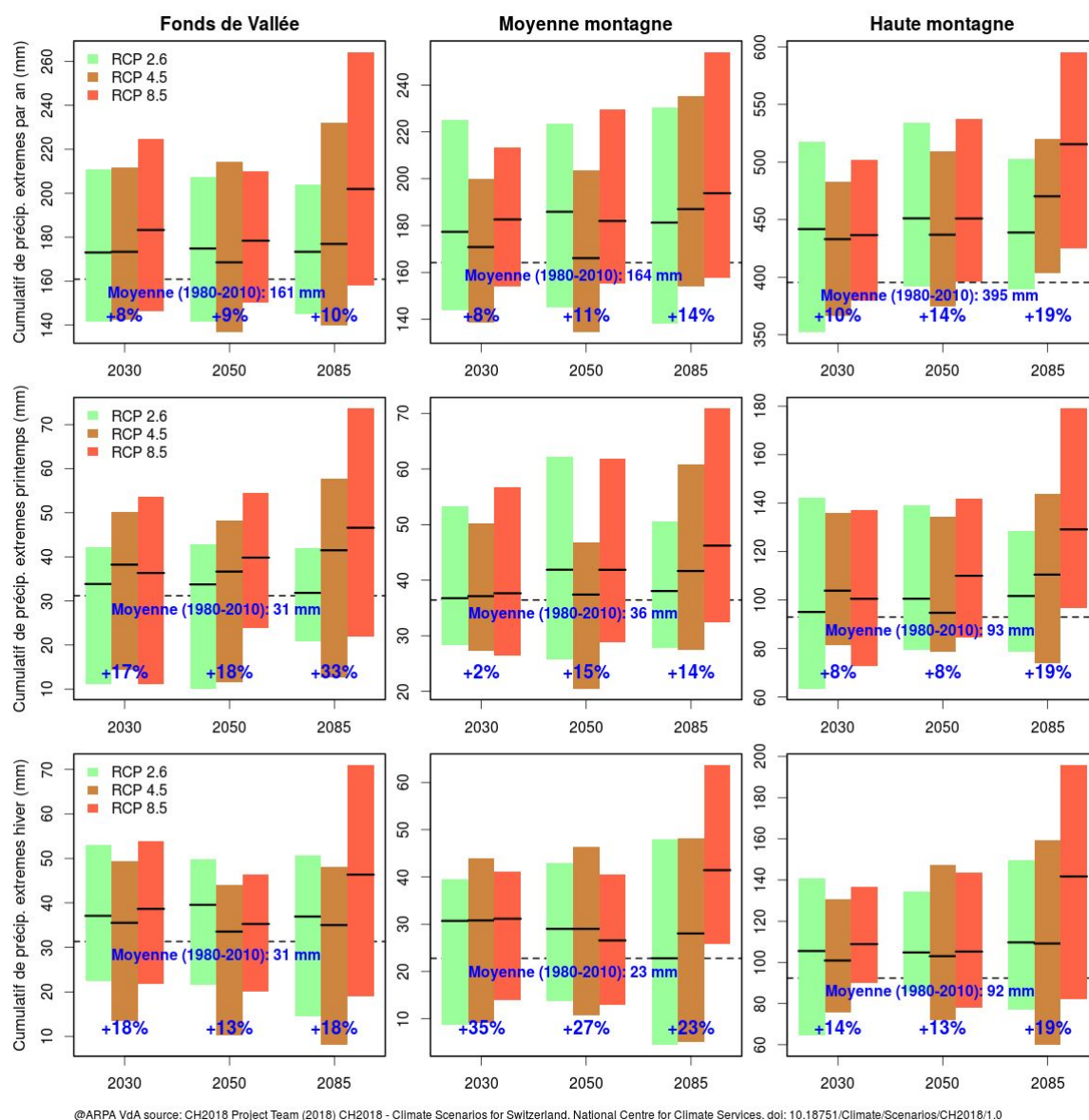


Figure 1.22. Variation du cumul annuel de précipitations dans les jours de précipitations extrêmes. Le seuil utilisé pour définir les jours de précipitations extrêmes (20 mm) représente le 95^{ème} percentile de la distribution des précipitations observées à l'échelle de l'EMB dans la période historique 1980-2010. La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés.

2. Évolution des milieux naturels physiques et vivants

L'évolution des différents paramètres climatiques que sont les températures, les précipitations et les événements extrêmes auront, et ont déjà, un impact direct sur les milieux naturels de l'EMB. L'évolution de ces paramètres modifiera en profondeur les paysages et les saisons dans l'EMB, ce qui implique des impacts importants sur les différents secteurs d'activités humaines (Figure 1.1). L'impact sur les milieux naturels et physiques est considéré dans les paragraphes suivants.

2.1 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 isolant 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*) une accélération de la fonte 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). De plus, à l'échelle de l'EMB, la station de Cignana (2150 m), en Vallée d'Aoste, qui offre l'une des plus longues séries de mesures de la neige (1927-2018) montre une baisse de 50% de la hauteur maximale de neige par rapport à la période 1961-1990 (-12% par décennie ; Figure 2.1).

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 2.2). Plus haut et en versant nord, par exemple vers le sommet des Grands Montets **autour de 3000 m d'altitude, on s'attend à perdre entre 10 et 15 jours d'enneigement en 2050**. On s'attend à une réduction générale de l'enneigement jusqu'à 3000 m mais **le contexte topographique jouera un rôle important dans le degré de réduction d'enneigement**. Ces prédictions pour l'EMB sont corroborées par des simulations réalisées ailleurs dans les Alpes du nord. Dans le massif de la Chartreuse notamment, au Col de Porte à 1500 m, la durée d'enneigement devrait reculer de 26 à 48 jours à l'horizon 2050, pour le scénario médian (Verfaillie *et al.*, 2018).

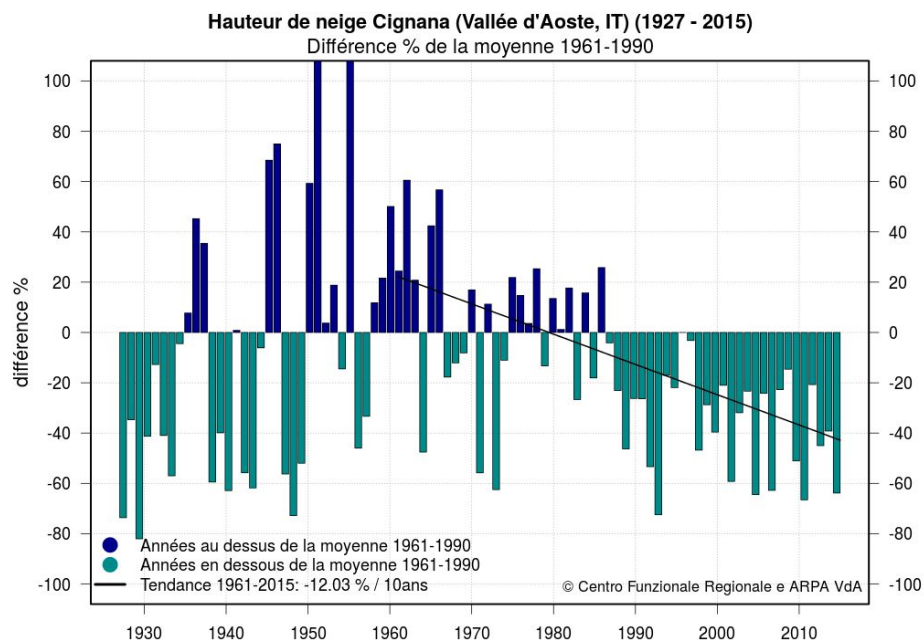


Figure 2.1. Diminution de la hauteur de neige annuelle à la station météo du lac de Cignana (2150 m, Vallée d'Aoste) par rapport à la période de référence 1961-1990.

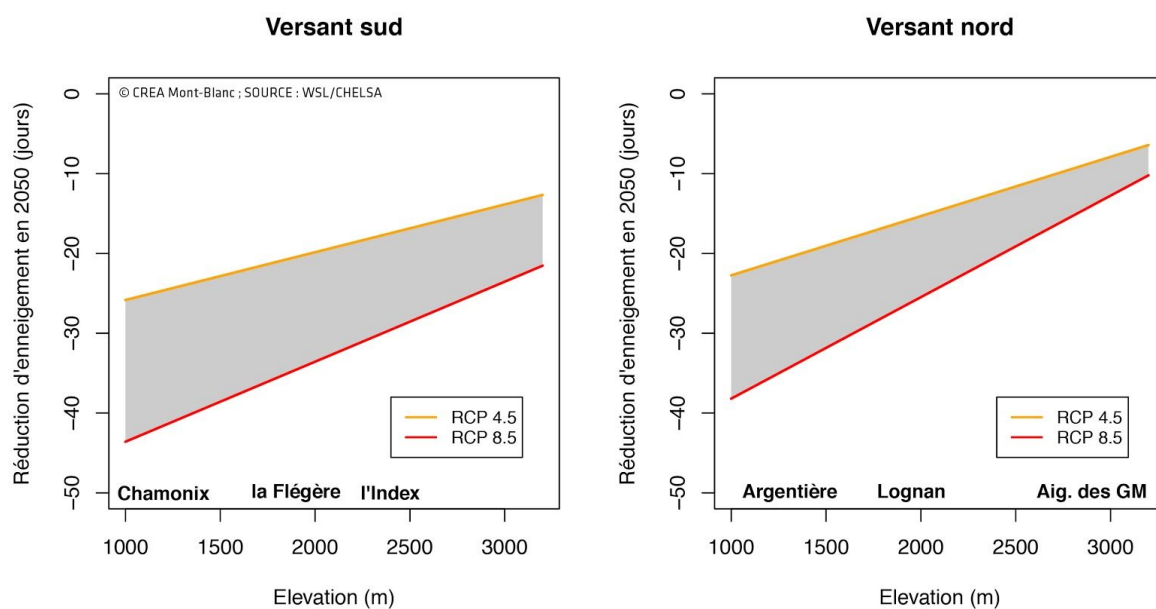


Figure 2.2. Réduction de la durée d'enneigement entre la période actuelle et 2050 sur les versants sud et nord de la vallée de Chamonix.

2.2 Retrait glaciaire



Figure 2.3. 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. Dans les Alpes françaises, les glaciers ont perdu environ 25% de leur surface depuis la fin des années 1960 (Gardent et al., 2014 et Figure 2.4). 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).

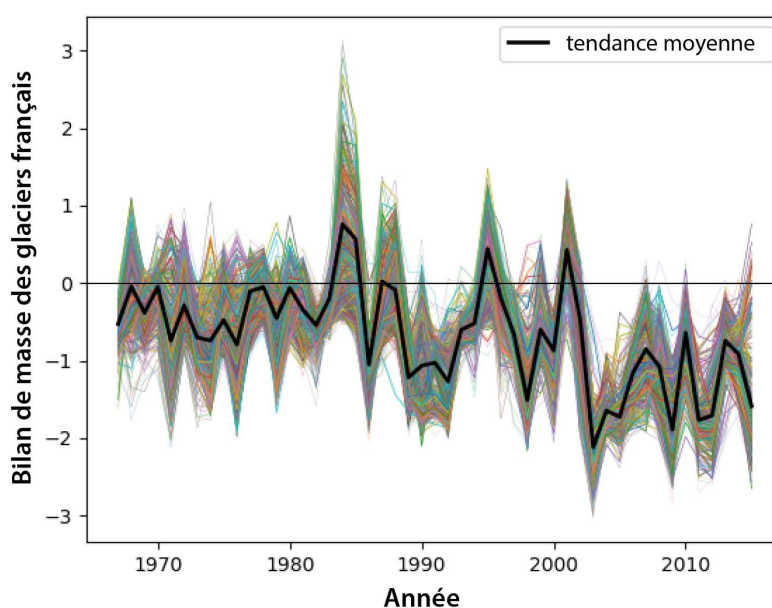


Figure 2.4. Reconstruction du bilan de masse des glaciers des Alpes françaises pour la période 1967-2015. **Source :** IGE*/CNRS*

Les glaciologues suisses anticipent la disparition de 90% des glaciers sur leur territoire d'ici 2090 dans un scénario climatique médian (CH2014-Impacts). En 2050, 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 2.5). Selon le scénario RCP 8.5 (le plus pessimiste), le glacier d'Argentière aura disparu en 2080 et la Mer de Glace aura entièrement fondue à la fin du siècle (Vincent et al. 2019). Dans l'EMB de manière générale, les tendances observées et prédites tendent clairement vers une accélération du retrait des glaciers.

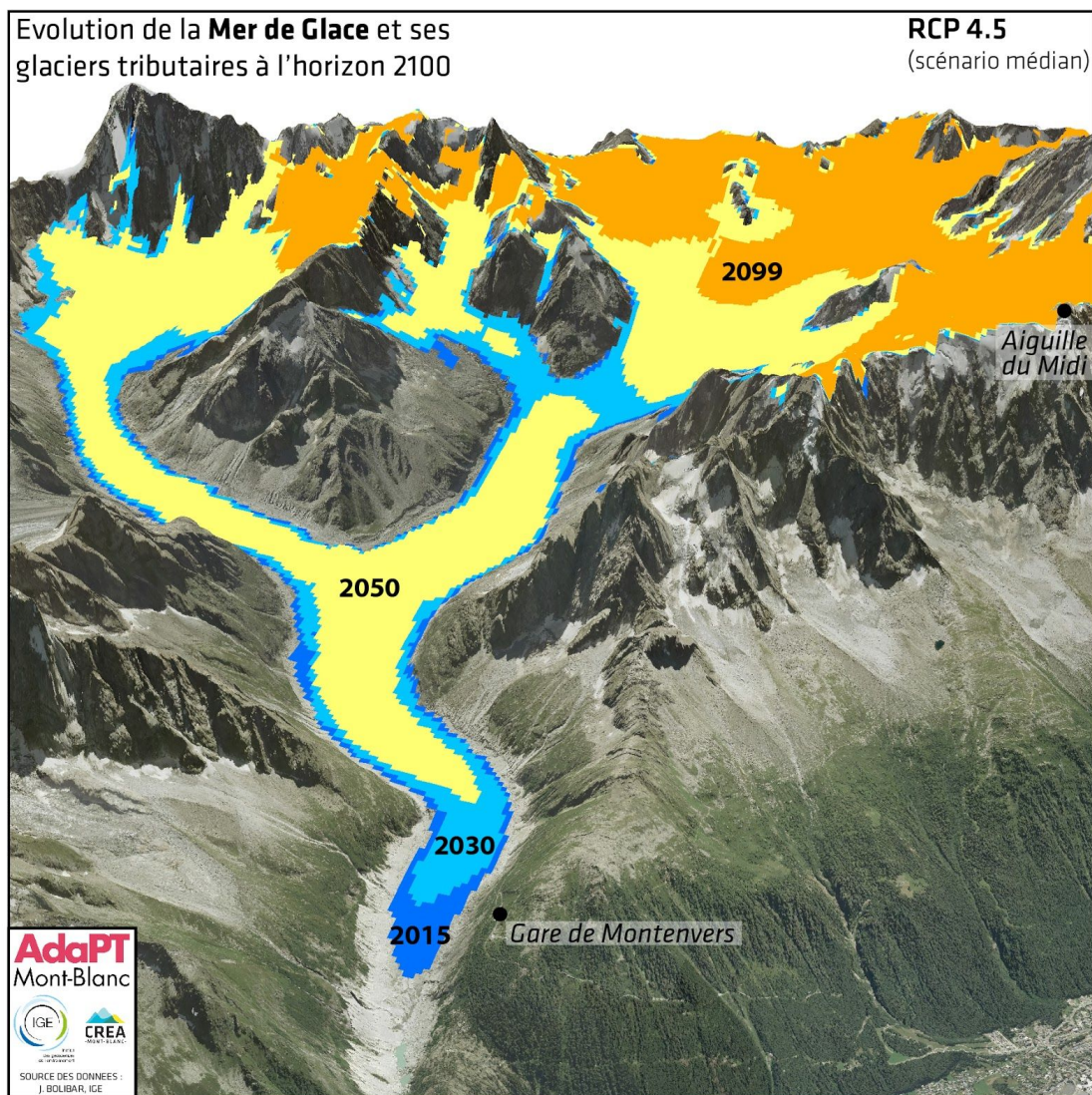


Figure 2.5. Evolution de la Mer de Glace (vallée de Chamonix) modélisée en 2030, 2050 et 2099 en fonction des données climatiques et des paramètres physiques du glacier. Le retrait du front de la Mer de Glace est aussi accompagné par une importante réduction de son épaisseur. Le fond d'image est issu de photos aériennes de l'IGN datant de 2008.

Le recul glaciaire implique aussi une réduction de la quantité d'eau stockée sous forme de glace qui maintenant joue un rôle important dans plusieurs cours d'eau de l'EMB. La Figure 2.6 montre l'évolution projetée de la quantité totale d'eau stockée dans six glaciers représentatifs (notamment Mer de Glace et Argentière versant français, Rutor et Pré de Bar en Vallée d'Aoste, et Trient et Corbassière en Valais), selon une étude récemment publiée au niveau des Alpes (Zekollari et. al, 2019)

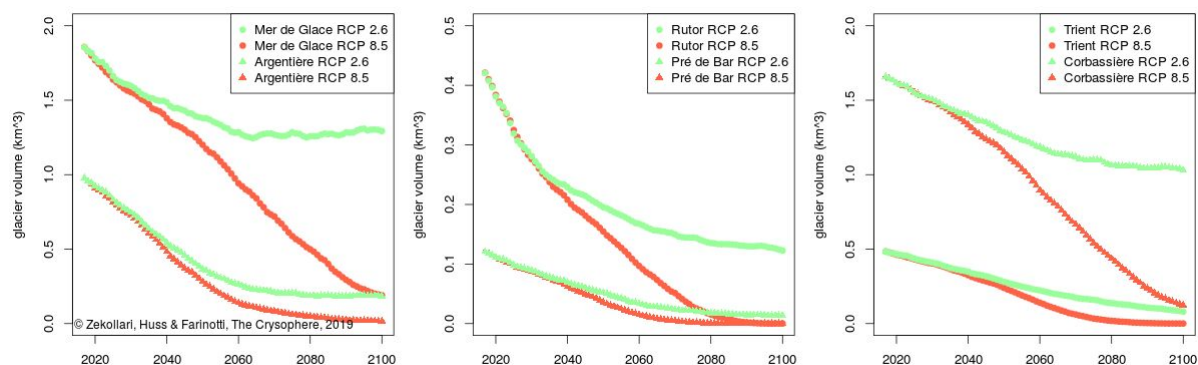


Figure 2.6. Evolution de la quantité d'eau stockée dans des glaciers représentatifs de l'EMB. Source : Zekollari et al., 2019.

2.3 Dégradation du permafrost

Le permafrost, qui se définit par tout substrat maintenu dans des conditions de température $< 0^{\circ}\text{C}$ 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, la dégradation du permafrost peut entraîner une plus forte instabilité des parois rocheuses. 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 et pourrait même totalement disparaître des faces sud du Mont-Blanc d'après les scénarios les plus critiques** (Magnin et al., 2017). La Figure 2.7 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 (GM, 3295 m) et de l'Aiguille du Midi (AdM, 3842 m), ce qui peut déstabiliser ces sites aménagés de téléphériques et fortement fréquentés par les touristes (Magnin et al., 2017).

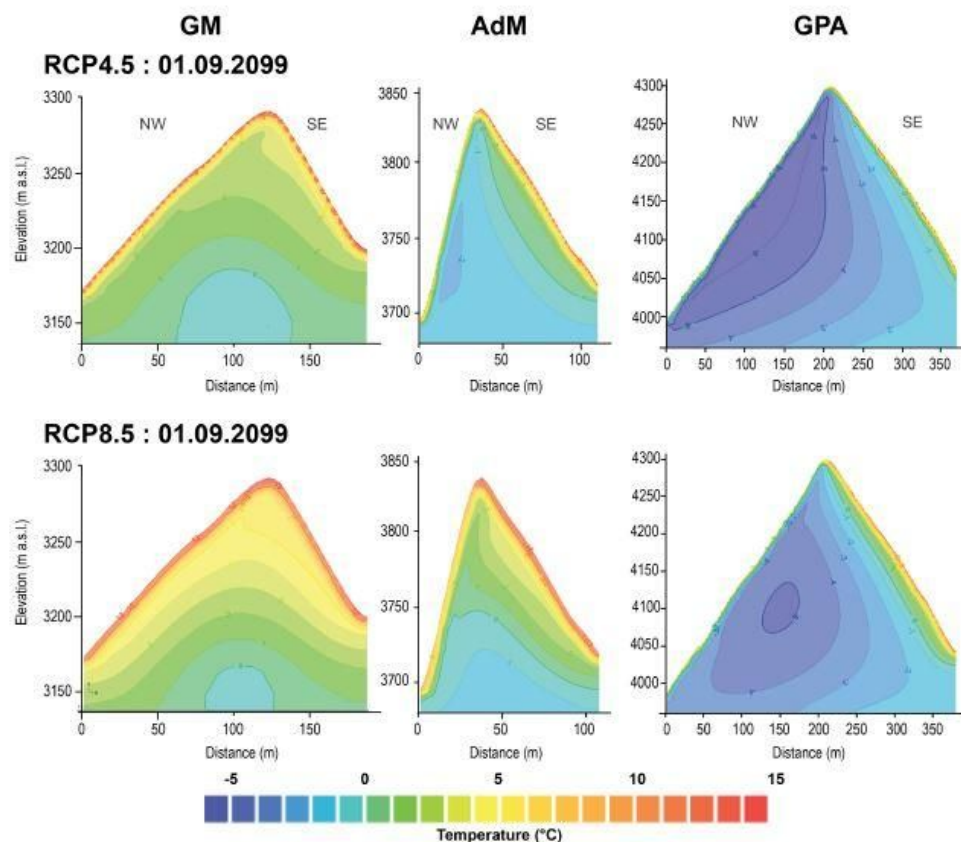


Figure 2.7. Températures en coupe au mois de septembre 2009 pour trois sites du massif du Mont-Blanc, en fonction des scénarios RCP 4.5 et 8.5 (Aiguille des Grands Montets, Aiguille du Midi et Grand Pilier d'Angle). Ces schémas montrent les températures de surface et en profondeur (en bleu les températures négatives). On note un dégel quasi-complet des Grands Montets (GM) dont les températures de surface sont largement au dessus de 0° dans les deux scénarios. La température de l'Aiguille du Midi (AdM) dépend fortement 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**

2.4 Remontée en altitude de la faune et la flore

Les paysages de l'EMB sont composés 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 2.8). En cas de réchauffement, 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 décennie** 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, probablement au détriment des espèces alpines adaptées à**

des conditions extrêmes mais souvent moins bonnes compétitrices. Ceci dit, la fonte des névés et des glaciers pourrait temporiser cette perte en offrant de nouveaux espaces à coloniser pour ces plantes. Autre échappatoire potentiel pour les plantes alpines, l'hétérogénéité topographique des montagnes. Celle-ci offre une grande diversité de conditions thermiques et nivales sur de petits espaces (à quelques mètres d'écart parfois), ce qui crée des "micro-refuges" permettant aux plantes alpines de trouver des conditions favorables sans monter plus haut en altitude (Scherrer et Körner 2011). Ces micro-habitats peuvent servir de zones tampons qui freineront la perte de diversité floristique dans l'EMB pendant les décennies à venir.

2.5 Avancée du printemps et allongement de la durée de végétation

Outre la migration, les espèces, naturelles ou domestiques, disposent d'une autre stratégie d'adaptation: 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 événements saisonniers comme la floraison, la reproduction ou la migration, de 2 à 5 jours par décennie pour les plantes et animaux terrestres au cours des 50 dernières années.** Par exemple, l'arrivée des oiseaux migrateurs a avancé d'environ 15 jours en 30 ans, et 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., 2013).

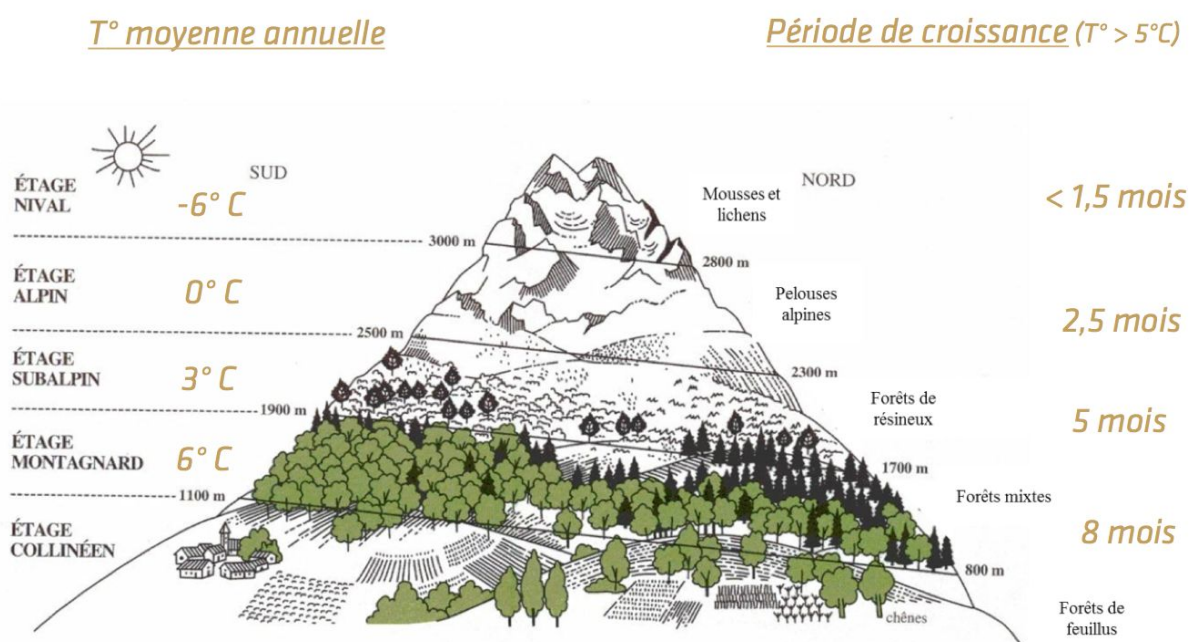


Figure 2.8. Conditions climatiques et période propice au développement de la végétation en fonction de l'altitude. Les températures à gauche indiquent la température annuelle moyenne par altitude. Pour les arbres, par exemple, il faut en moyenne une température supérieure à 5°C pour que la photosynthèse, 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 les plus rapides 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.

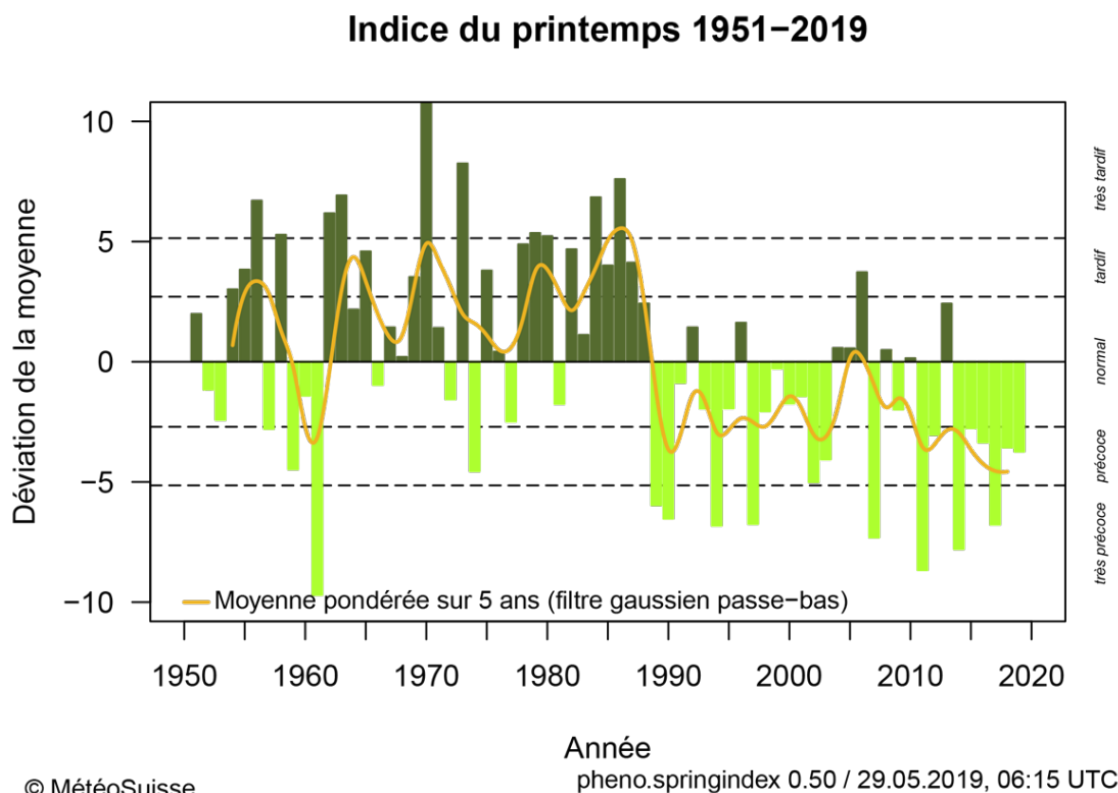


Figure 2.9. Evolution des dates de débourrement (éclosion des bourgeons) de la végétation en Suisse depuis 1951. On note une avancée sensible du printemps, de plus en plus au-delà de 5 jours d'avance par rapport à la moyenne ©MétéoSuisse

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 plus précoce (Figure 2.9). De ce fait, la saison de végétation est plus longue et la productivité est meilleure pour les plantes alpines dont la croissance est d'ordinaire limitée par les températures et la couverture neigeuse. **La durée de la saison de végétation actuelle est de deux à quatre semaines plus longue que celle des années 1960** (CH2018). **Les scénarios climatiques prévoient encore une augmentation sensible de la durée de cette saison végétative.** Cette augmentation (Figure 2.10) sera déjà significative en 2035 (de 7 à 38 %) et aura un impact d'autant plus important sur les écosystèmes de haute montagne comme les pelouses alpines aujourd'hui limités par l'enneigement. Nous pouvons nous attendre à plusieurs changements de végétation dans les années à venir, en lien avec une saison de croissance plus longue : *i*) la limite de la forêt qui remonte en altitude *ii*) une colonisation progressive en altitude par les landes (arbustes comme l'airelle, le genévrier ou le rhododendron) et des ligneux hauts (aulne vert et saules) *iii*) la remontée et densification des pelouses alpines dans les zones d'éboulis et de névés. Outre cet impact sur la distribution et la composition des différents écosystèmes, l'augmentation de la durée de végétation aura également un effet très important sur la productivité de ces écosystèmes, en termes de bilan annuel de CO₂, d'interaction avec les cycles de l'eau et des nutriments et d'interactions avec les processus géomorphologiques.

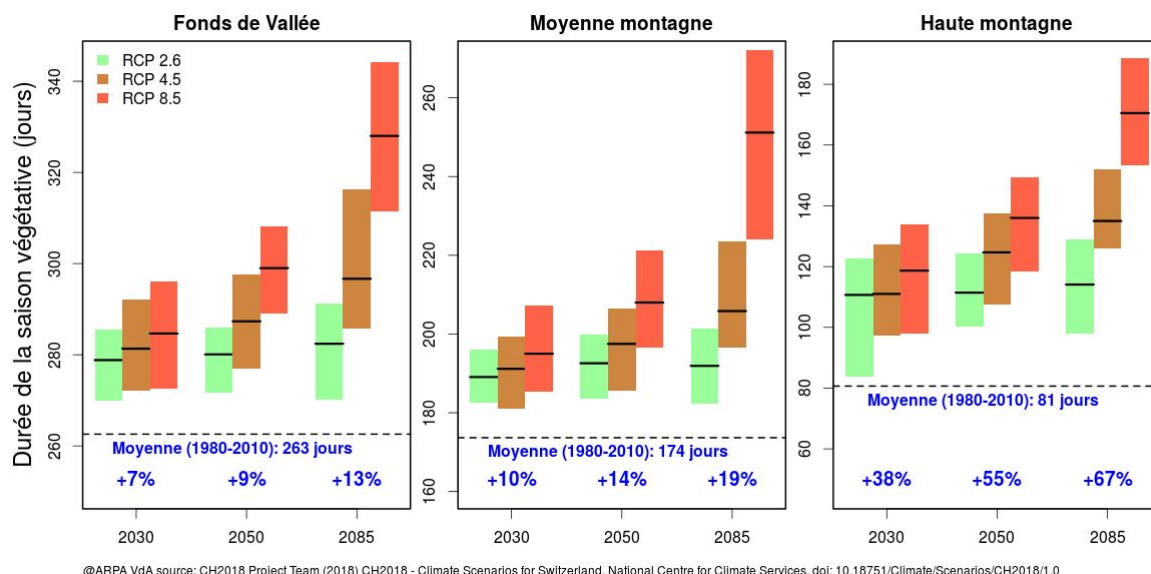


Figure 2.10. Variation de la durée de la saison végétative définie comme l'intervalle entre la première période chaude de l'année où la température est $> 5^{\circ}\text{C}$ pendant 6 jours consécutifs, et la première période froide où la température tombe sous les 5°C pendant 6 jours consécutifs entre juillet et décembre. La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés.

Cependant, pour certaines espèces, l'accroissement de la durée de végétation ou l'avantage d'une précocité printanière est à double tranchant. Pour la myrtille par exemple, très sensible au gel, ou encore d'autres espèces comme le saule herbacé, un démarrage plus précoce augmente le risque de dommages liés aux événements plus fréquents de gel tardif* au printemps (Wheeler et al., 2014). De même, pour les grands herbivores comme le bouquetin ou le chamois, 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 et qui a tendance à peu évoluer. Les années à hiver et/ou printemps chauds, il en résulte un décalage entre le pic de production de la végétation qui est de plus en plus précoce et les besoins en herbe tendre des bouquetins qui sont maximums au moment du sevrage des jeunes tout juste sevrés. Ainsi, toutes les espèces ne répondant pas de la même façon au changement climatique, il en résulte un **risque important de désynchronisation entre espèces au sein de l'écosystème**.

Une forte modification des services écosystémiques de la haute montagne est donc à attendre dans le futur. Des études spécifiques sur ce sujet seront nécessaires pour anticiper les conséquences de ces phénomènes dans une optique de gestion, des risques comme des opportunités. Il faut en tout cas préciser, que ces scénarios, notamment de durée de la saison végétative sont basés que sur la température de l'air et ne prennent pas en compte la durée de l'enneigement ou la sécheresse estivale, phénomènes qui peuvent avoir des effets très forts et négatifs sur la phénologie des espèces alpines.

2.6 Pullulation et disparition d'espèces

Sans parler de pullulation, cette remontée en altitude des espèces conjuguée à 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). Des analyses faites sur le massif du Mont-Blanc confirment cette tendance sur le territoire de l'EMB, où on observe une hausse marquée dans la surface occupée par la végétation entre 2500 et 3000 m entre 1984 et 2017

(Figure 2.11). Croisé avec le recul des glaciers et la fonte des névés, **on peut s'attendre à une transformation des paysages de haute montagne, même au coeur du massif du Mont-Blanc, vers des milieux de plus en plus rocheux et végétalisés.**

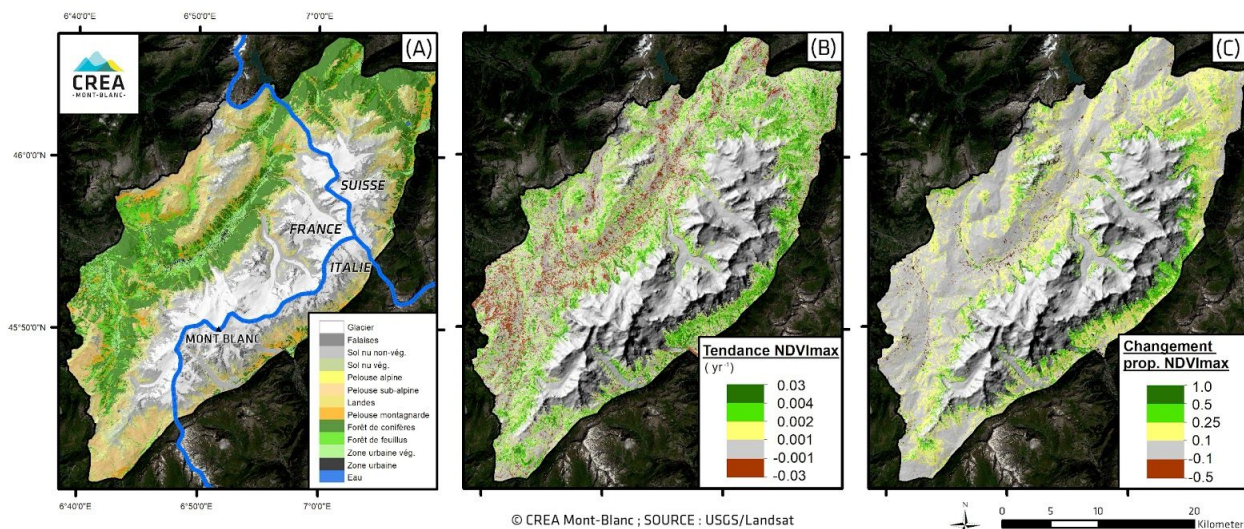


Figure 2.11. Evolution de la productivité végétale (NDVImax) entre 1984 et 2017 dans le massif du Mont-Blanc, d'après une analyse des images satellitaires de type Landsat. Le panel (A) indique la localisation des différents milieux naturels du massif (Source : J. Renaud, LECA) ; la carte (B) montre les tendances linéaires de la productivité végétale entre 1984 et 2017 et le panel (C) indique les changements proportionnels de productivité sur la même période. Les zones en couleur verte foncée indiquent une augmentation importante de la couverture végétale, le plus souvent suite au recul des névés et des glaciers.

Chez les animaux, notamment ceux qui ne régulent pas la température de leur corps (parasites, insectes, amphibiens, reptiles), les variations de températures 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, Jakoby et al., 2019). **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 sécheresses estivales. L'opportunité que constitue le changement climatique d'augmenter son aire de répartition en montant en altitude est donc contrecarrée par ces vulnérabilités. 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 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, comme les combes à neige* et les zones humides, sont particulièrement menacés par les changements climatiques en cours.

3. Impacts sur les secteurs socio-économiques

Parmi les nombreux secteurs socio-économiques qui seront impactés par le changement climatique à l'échelle de l'EMB, les secteurs prioritaires définis dans la démarche participative du projet Adapt Mont-Blanc sont les **ressources naturelles**, le **tourisme** et les **risques naturels**. Administrateurs locaux des trois pays, ONG, techniciens des administrations régionales et cantonales, socio-professionnels et différentes parties-prenantes ont contribué à la démarche participative lors de plusieurs rencontres transfrontalières. L'objectif principal de la démarche participative était la définition des secteurs considérés comme prioritaires par les territoires de l'EMB et qui devraient être approfondis en termes d'impacts. Les sections suivantes du rapport climat ont pour objectif de présenter une première analyse de ces impacts, basée à la fois sur l'élaboration d'indicateurs spécifiques réalisée dans le cadre de ce projet et sur un état de l'art de la bibliographie scientifique disponible. Cette analyse n'est donc pas exhaustive, elle ouvre la porte vers des études complémentaires spécifiques sur certains points, mais elle offre déjà de solides éléments, cohérents et multisectoriels, pour appuyer le développement des plans d'adaptation aux changements climatiques au niveau de l'EMB.

3.1 Eau

L'eau représente une ressource naturelle fondamentale pour la vie. Or les changements climatiques sont déjà en train d'impacter le cycle de l'eau en montagne. Dans les hauts bassins versants, la hausse des températures associée à une redistribution saisonnière des précipitations (cf. 1.3) et à une réduction de l'enneigement au dessous de 2000-2500 m (cf. 2.1) et la fonte des glaciers (cf. 2.2) auront des impacts sur la disponibilité en eau dans les vallées.

On s'attend à des sécheresses estivales plus fréquentes et à un déficit en eau des sols, conditions qui induisent un stress hydrique plus fréquent pour la végétation pendant la période annuelle de croissance (Figure 1.20). Les modèles prévoient un **assèchement des sols en période estivale, avec une remontée de la zone déficitaire en eau (P-ETP) de 600 m à 900 m selon le scénario** (Figure 3.1). Dans le scénario médian (RCP 4.5), le déficit hydrique s'accroîtrait avec une diminution d'environ 40 mm à 60 mm d'eau sur l'ensemble du territoire. 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. 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. On remarque aussi que ce bilan est à présent 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.

BILAN HYDRIQUE ESTIVAL (actuel et en 2050 - RCP 4.5)

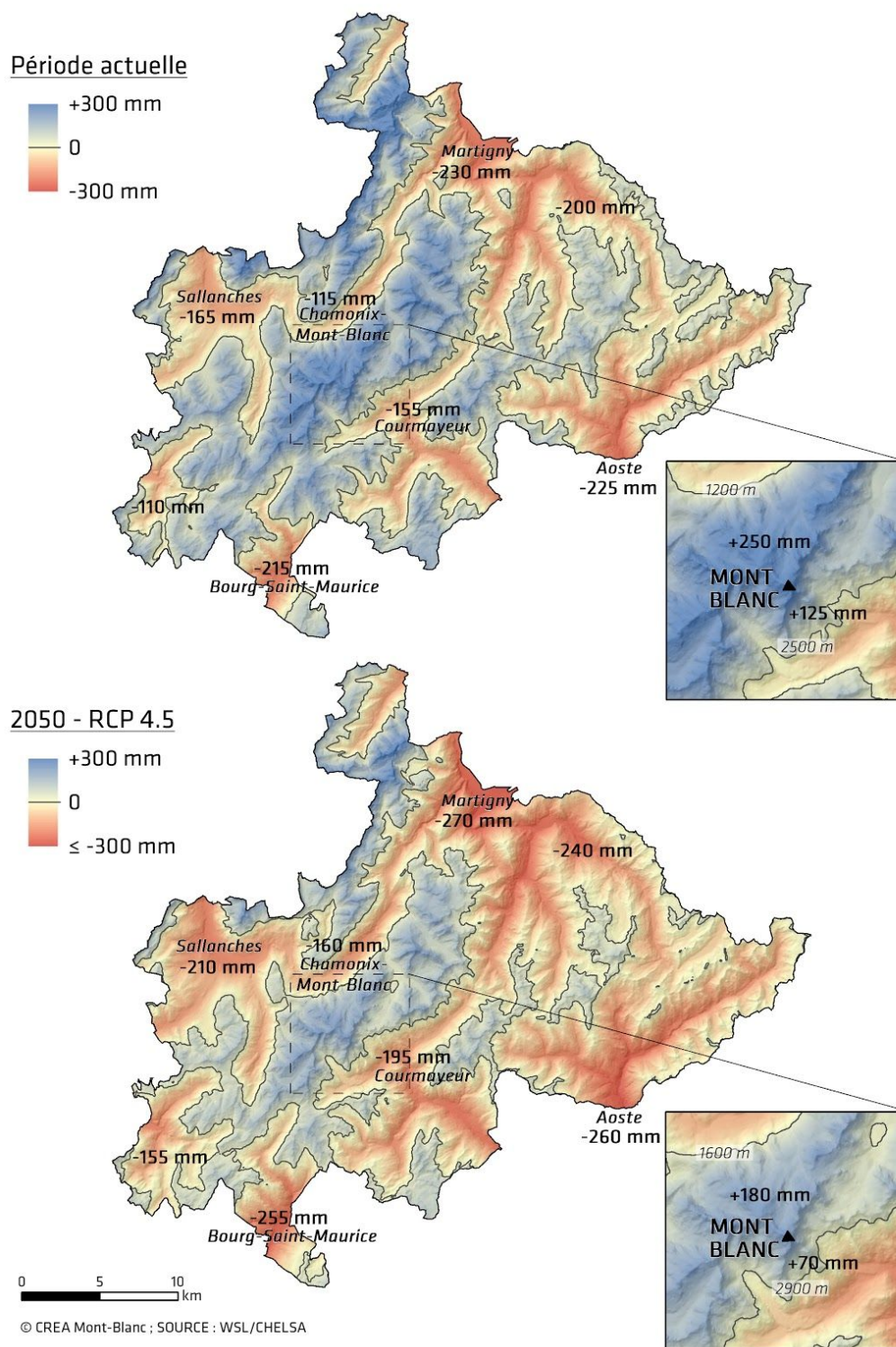
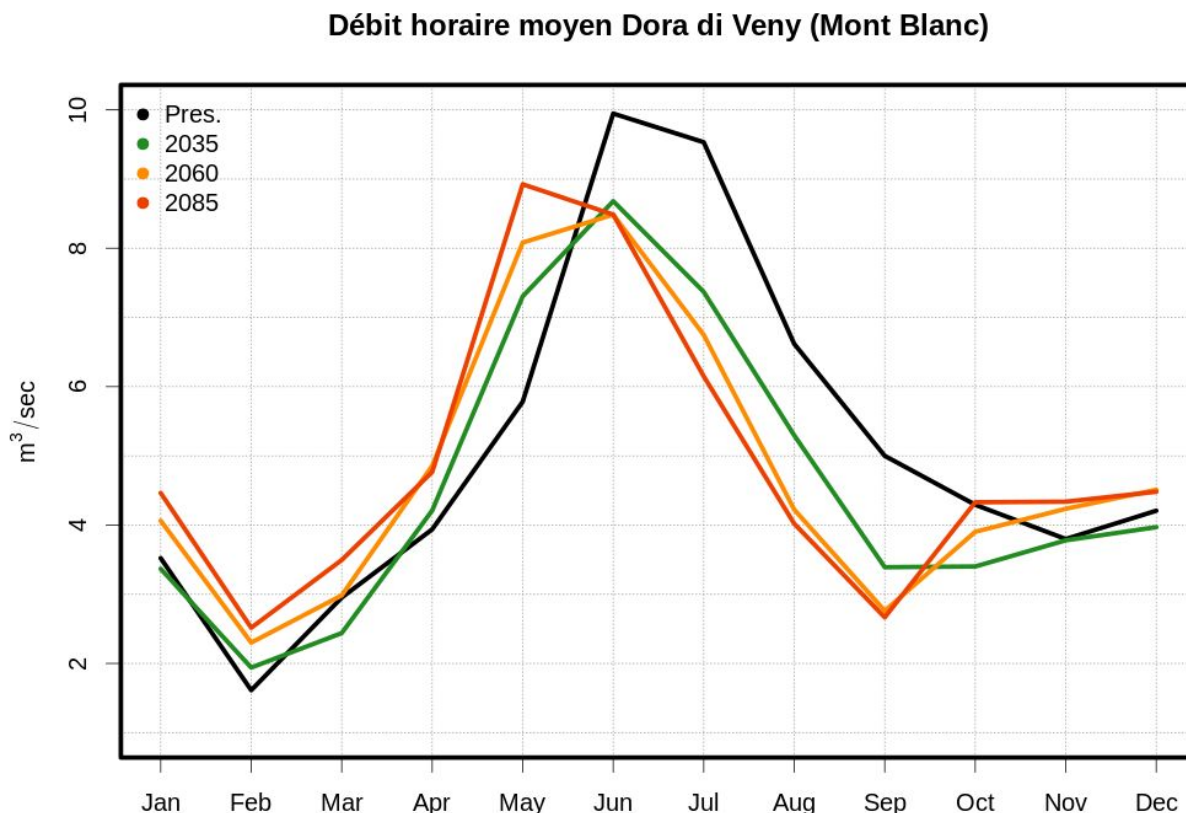


Figure 3.1. Bilan hydrique estival (P-ETP) pour la période actuelle et en 2050. Une valeur de 0 représente un équilibre entre l'eau qui arrive sous forme de précipitations et l'eau qui part sous forme d'évaporation potentielle; les valeurs positives indiquent un excès de précipitations tandis que les valeurs négatives indiquent un déficit en eau.

Pour ce qui concerne le **débit des cours d'eau**, la Figure 3.2 montre les scénarios d'évolution du débit d'un torrent sur le côté italien de l'EMB (Doire de Vény, Courmayeur, Vallée d'Aoste), obtenus avec un modèle hydrologique qui tient 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 du débit vers la fin de l'hiver et le début du printemps**. Au contraire, la réduction des précipitations en été se traduira par **une baisse du débit estival**. 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.



© Centro Funzionale Regionale, CIMA Foundation et ARPA VdA

Figure 3.2. Modification du régime hydrique (débits) sur le côté italien de l'EMB (Doire de Vény, Courmayeur, 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. **Source : CIMA Foundation et Centro Funzionale Regione Valle d'Aosta.**

Ces modifications pourront entraîner des effets sur le risque de crues hivernales (cf 3.6) et en revanche des période de sécheresse pendant les mois d'été et de début d'automne. Les années de réduction sensible des débits, on peut anticiper des conflits d'usage de la ressource : humaine, agricole, hydroélectrique et débit réservé pour les écosystèmes en aval. Pour mieux prévenir ces conflits potentiels, des études spécifiques au niveau de chaque cours d'eau et bassin versant seront nécessaires, ainsi qu'une redéfinition des droits d'usages, le développement d'une culture de co-usage de l'eau, l'optimisation des techniques d'irrigation et aussi, si nécessaire, la réalisation de réservoirs de stockage en altitude, qui pourront compenser la perte de surface glaciaire et servir pour réguler les débits dans le temps.

3.2 Agriculture

L'agriculture est un des secteurs économiques qui pourront être le plus directement impactés par le changement climatique : **la hausse des températures et la modification des régimes de précipitations auront des impacts potentiels très forts sur la productivité animale et végétale, et également sur la distribution et la diffusion des pathogènes**. Dans l'ensemble, ces effets entraîneront une modification de la viabilité de certaines cultures selon les territoires. Des analyses d'impact au niveau européen et national ont souligné à la fois des opportunités de plus grande productivité pour les cultures et pâturages dans un contexte de réchauffement modéré (1-3°C) et de disponibilité accrue en CO₂ pour la photosynthèse, et des risques liés à la variabilité des précipitations et à l'augmentation des événements extrêmes, notamment les événements de fortes précipitations, les sécheresses et les canicules. Au niveau de l'EMB, les activités agricoles les plus importantes sont les **cultures d'arbres fruitiers et de vignes** dans la Vallée d'Aoste et en Valais en particulier et le **pastoralisme** au niveau des trois pays.

Pour ce qui concerne la production de fourrage, avec une saison hivernale raccourcie (Figure 2.2), les besoins en fourrage des éleveurs vont être réduits suite à l'augmentation des températures qui pourra soit entraîner une production primaire de 5% à 15% plus importante (Sérès, 2010) soit permettre une fauche supplémentaire (Chaix et al., 2017) suite à l'allongement de la période de végétation (Figure 2.10). Différents agriculteurs de la Vallée d'Aoste, lors de la réunion transfrontalière à Chamonix en novembre 2018, témoignent déjà de la possibilité de plus en plus fréquente d'une troisième fauche en altitude (environ 1500 m) en fin de saison. En revanche, ces bénéfices pourraient être limités si des épisodes de sécheresses surviennent, accentués par des températures élevées. Les plantes ont alors un besoin en eau encore plus grand et les sols sont plus rapidement asséchés. Les conséquences peuvent être un arrêt de la production primaire pendant les mois secs et chauds, voire une dégradation du couvert végétal (Cremonese et al., 2017).

Quatre cas d'études quantitatifs relatifs aux activités agricoles plus significatives à l'échelle de l'EMB sont présentés ici. En particulier nous avons élaboré des scénarios de modification des cycles des **pathogènes**, une analyse des conditions d'optimalité pour la **viticulture**, une projection du risque de **gelées tardives**, et nous avons calculé un indice lié à **au stress pour les vaches laitières**.

Cycles des pathogènes

Les parasites et maladies des arbres fruitiers vont pouvoir bénéficier de la hausse des températures pour se propager et se reproduire plus rapidement sur les cultures d'arbres fruitiers. Par exemple le carpocapse est un insecte dont la larve se développe à l'intérieur des fruits à pépins, et notamment dans les pommes et les poires, causant des dégâts importants sur les récoltes. Les impacts que les insectes phytophages pourront avoir sur les cultures de l'EMB seront liés principalement aux processus suivants :

- modifications du nombre de générations par saison (exemple d'espèces potentiellement concernées : *Lobesia botrana*, *Empoasca vitis*, *Planococcus ficus*, *Tuta absoluta*, *Cydia pomonella*, ...)
- variation de la distribution géographique avec une diffusion plus large en altitude ou l'arrivée de nouveaux pathogènes (exemple d'espèces : *Lobesia botrana*, *Eupoecilia ambiguella*, *Scaphoideus titanus*, *Thaumetopoea pityocampa*, *Leptinotarsa decemlineata*, ...)
- modification de la phase d'hivernage donc phase d'activité du pathogène plus précoce (exemple d'espèces : *Drosophila suzukii*, *Cacopsylla pyri*, *Cacopsylla melanoneura*, ...)

- propagation d'espèces invasives (exemple d'espèces: *Halyomorpha halys*, *Popillia japonica*, *Tuta absoluta*, *Harmonia axyridis*, ...)

L'ensemble de ces facteurs résultent en une aggravation des effets délétères sur les cultures (exemple d'espèces : *Zeuzera pyrina*, *Lobesia botrana*, *Eupoecilia ambiguella*, *Scaphoideus titanus*, *Thaumetopoea pityocampa*, *Drosophila suzukii*, ...)

Des scénarios de modification du cycle de vie de certains des pathogènes indiqués ci-dessus ont été élaborés en utilisant des modèles phénologiques spécifiques (*devRate* R package, Rebaudo et al., 2017) basés sur les différents scénarios climatiques. Le choix des pathogènes prioritaires a été fait en collaboration avec les chercheurs de l'Institut Agricole Régional de la Vallée d'Aoste (IAR, www.iaraosta.it).

La Figure 3.3 montre que le réchauffement des températures sera bénéfique pour **la carpocapse des poires et des pommes** (*Cydia pomonella*), un des principaux ravageurs des pommiers et des poiriers : **le risque de développer une troisième génération par an sera déjà significatif en 2035 lors des années chaudes en fond de vallée**. Ce risque et les dégâts potentiels sont forts pour les variétés tardives dont les fruits seront encore sur les arbres lors du développement de cette troisième génération. Le choix des variétés sera donc un outil d'adaptation important (Swiss National Center for Climate Services)

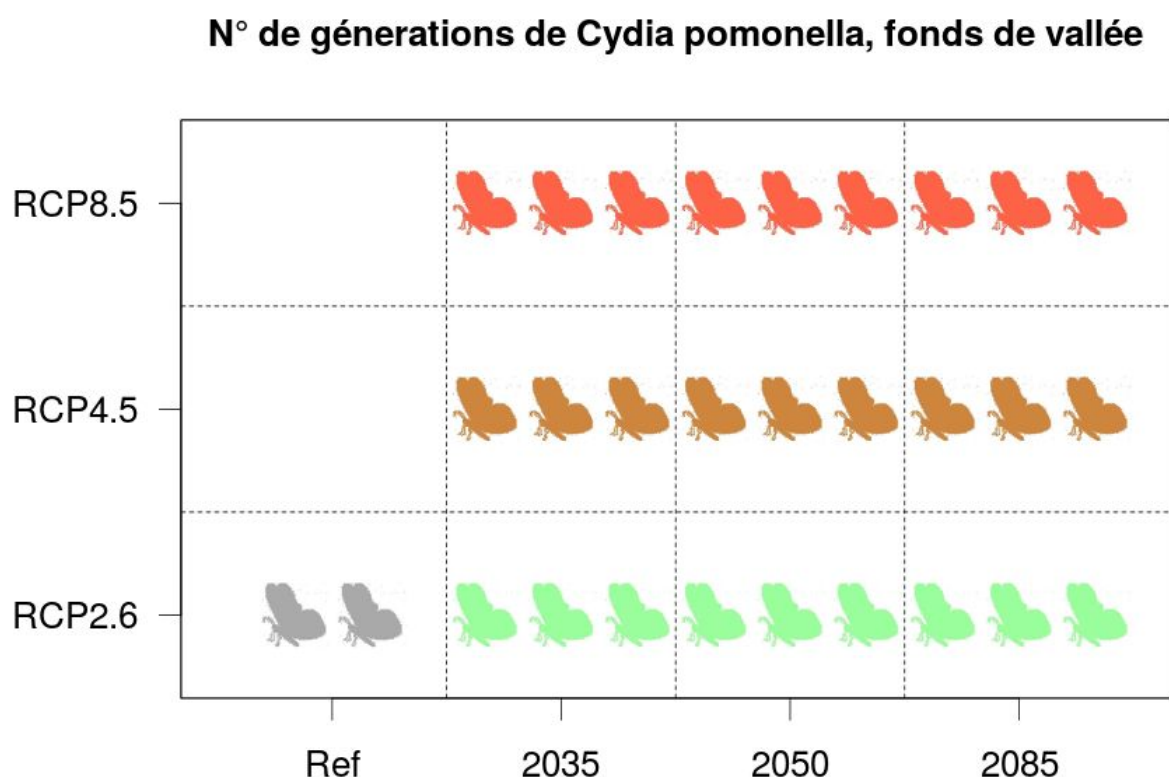


Figure 3.3. Modification du nombre de générations de *Cydia pomonella* (carpocapse des poires et des pommes) en fonds de vallée.

La Figure 3.4 montre la même analyse pour **l'eudémis de la vigne** (*Lobesia botrana*) qui produit déjà actuellement trois générations par an, ce qui en fait un des ravageurs majeurs du vignoble. Avec le

réchauffement des températures le risque d'une quatrième génération apparaît en 2035 et l'occurrence d'une quatrième voire cinquième génération après 2050 selon les scénarios 4.5 (intermédiaire) et 8.5 (pessimiste). Ces résultats impliquent des effets importants sur la viticulture, quand on considère que les chenilles des générations successives non seulement perforent les grains en cours de maturation mais aussi créent des portes d'entrée pour l'installation et la propagation du *Botrytis cinerea*. (source: www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/eudemis/). En conclusion, même en tenant compte du rôle de l'hygrométrie et des précipitations comme facteurs limitants, on peut estimer une significative augmentation des dégâts provoqués par les eudémis.

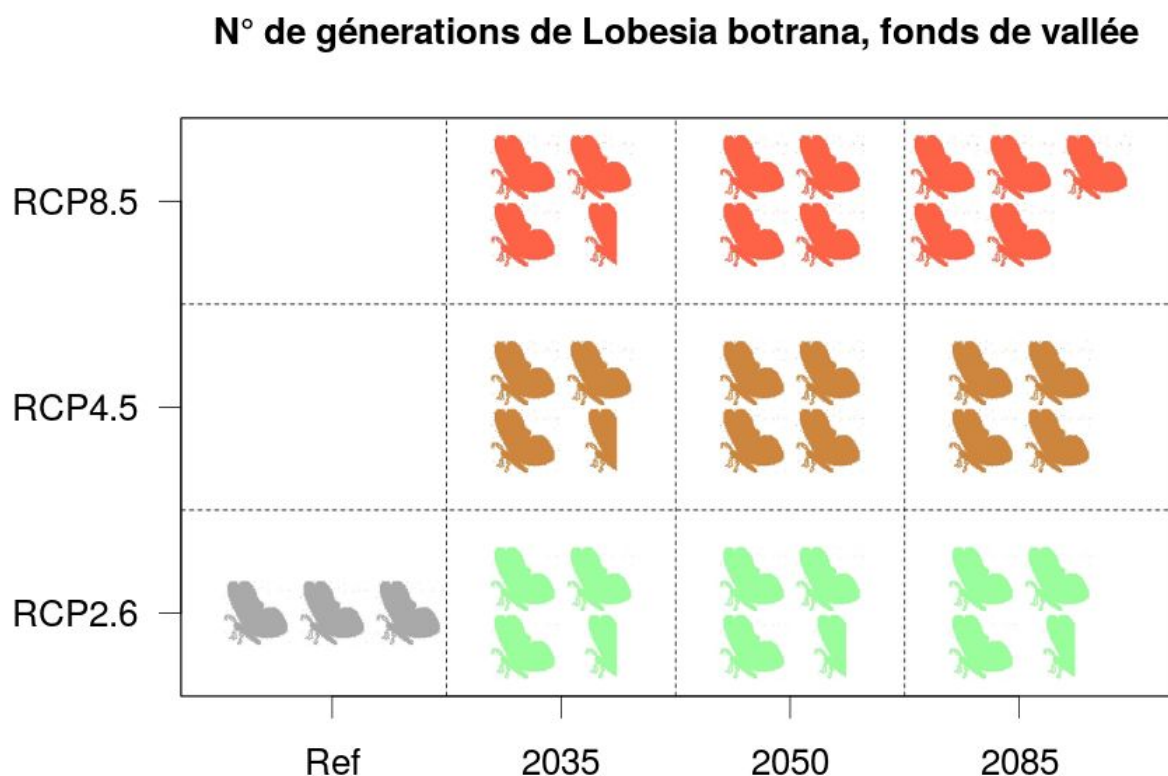


Figure 3.4. Modification du nombre de générations de *Lobesia botrana* (Eudémis de la vigne) en fond de vallée.

La Figure 3.5 montre les scénarios d'évolution des générations de la **mineuse de la tomate (*Tuta absoluta*)**, un ravageur originaire d'Amérique du Sud, apparu en Europe après les années 2000 qui impacte principalement l'horticulture: il se développe sur la tomate, la pomme de terre, l'aubergine, la poire-melon ou pépino et les piments. Ce papillon peut générer des pertes pouvant aller jusqu'à 80-100% des rendements. Une génération de plus (de cinq à six) est prévue pour 2035 et jusqu'à huit générations sont à attendre pour la fin du siècle dans le scénario 8.5.

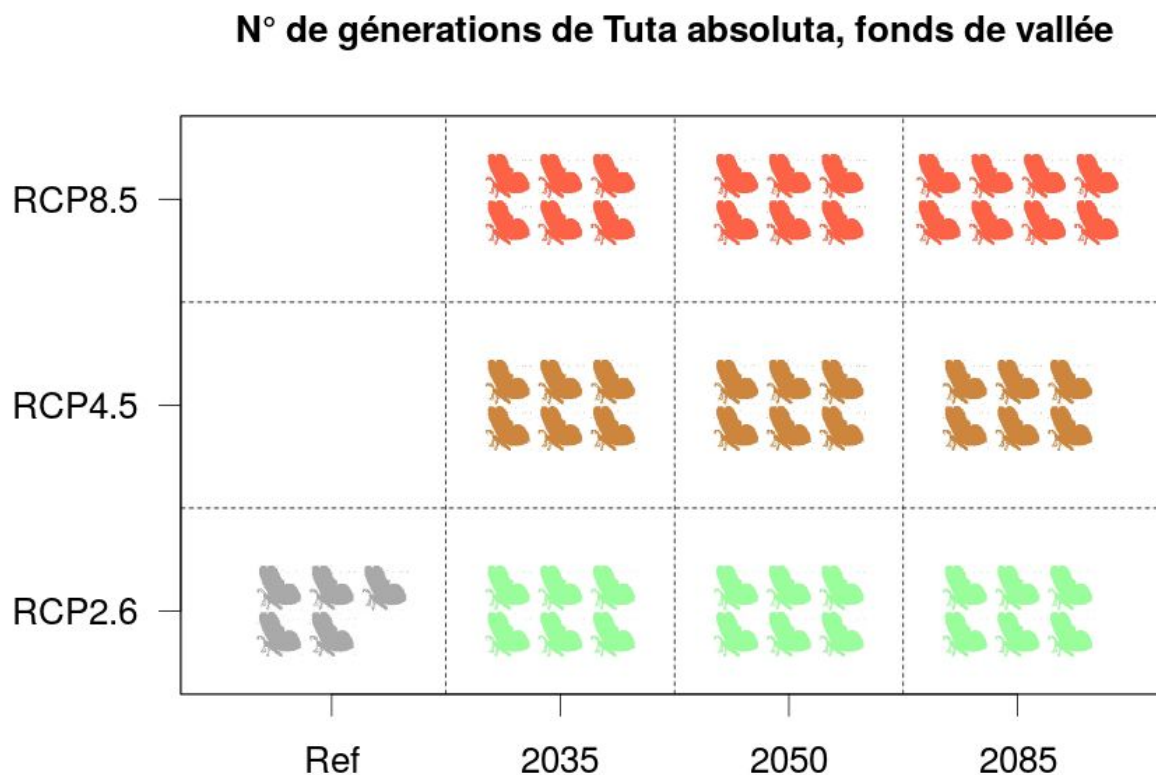


Figure 3.5. Modification du numéro de générations de *Tuta absoluta* (la mineuse de la tomate) en fonds de vallées.

En conclusion, pour les trois espèces d'insectes ravageurs considérées, une **augmentation du nombre de générations par an est prévue dès 2035 dans les fonds de vallée**. Des réponses et actions d'adaptation différentes seront nécessaires pour gérer ces modifications du cycle de vie des pathogènes, la plus évidente desquelles sera l'extension de la période de contrôle actif des pathogènes accompagnée par la mise en place des mesures de prévention (CH2014-Impacts, 2014).

Viticulture

La viticulture comme toutes les pratiques agricoles pourra être fortement impactée par le changement climatique. Le réchauffement observé dans les dernières décennies a déjà mené à une avancée significative des stades phénologiques (débourrement, floraison et véraison), à une augmentation des températures pendant la phase de maturation, à des vendanges plus précoces et à des modifications des caractéristiques biochimiques des raisins, notamment le rapport sucres/acides, et l'écart entre l'accumulation des sucres et celle des polyphénols et composantes aromatiques (e.g. Quénot et al., 2017, Moriondo et al., 2013, projet LACCAGE www6.inra.fr/laccage). Dans les années à venir on pourra s'attendre à des effets positifs liés à des conditions bio-climatiques plus favorables (meilleure productivité de certains cépages et extension potentielle du vignoble dans l'EMB), mais aussi à une adaptation des pratiques viticoles suivant les modifications phénologiques et physiologiques (anticipation des dates de vendange pour certains cépages et variation des caractéristiques biochimiques des raisins). Les conséquences sur la composition finale des raisins et des vins sont difficiles à prévoir car elles dépendent des effets du réchauffement sur le rendement et de toutes les interactions complexes entre disponibilité accrue de CO₂ dans l'atmosphère pour la photosynthèse, températures moyennes, sécheresse et stress thermique (projet LACCAGE 2018).

L'évolution de la viabilité climatique de l'EMB à la viticulture a été analysée en utilisant l'indice de Huglin (Figure 3.6, Huglin 1978). Cet indice est très utilisé dans la littérature pour les analyses de viabilité et d'impact (e.g. Quénol et al., 2017, Moriondo et al., 2013, Malheiro et al 2010, CH2014-Impacts, 2014) parce qu'il quantifie les conditions idéales de culture de chaque cépage et de production du sucre dans les raisins. L'indice de Huglin est basé sur le concept que chaque cépage nécessite une certaine quantité de chaleur accumulée pendant la saison de croissance pour être cultivé de façon efficace dans le long-terme.

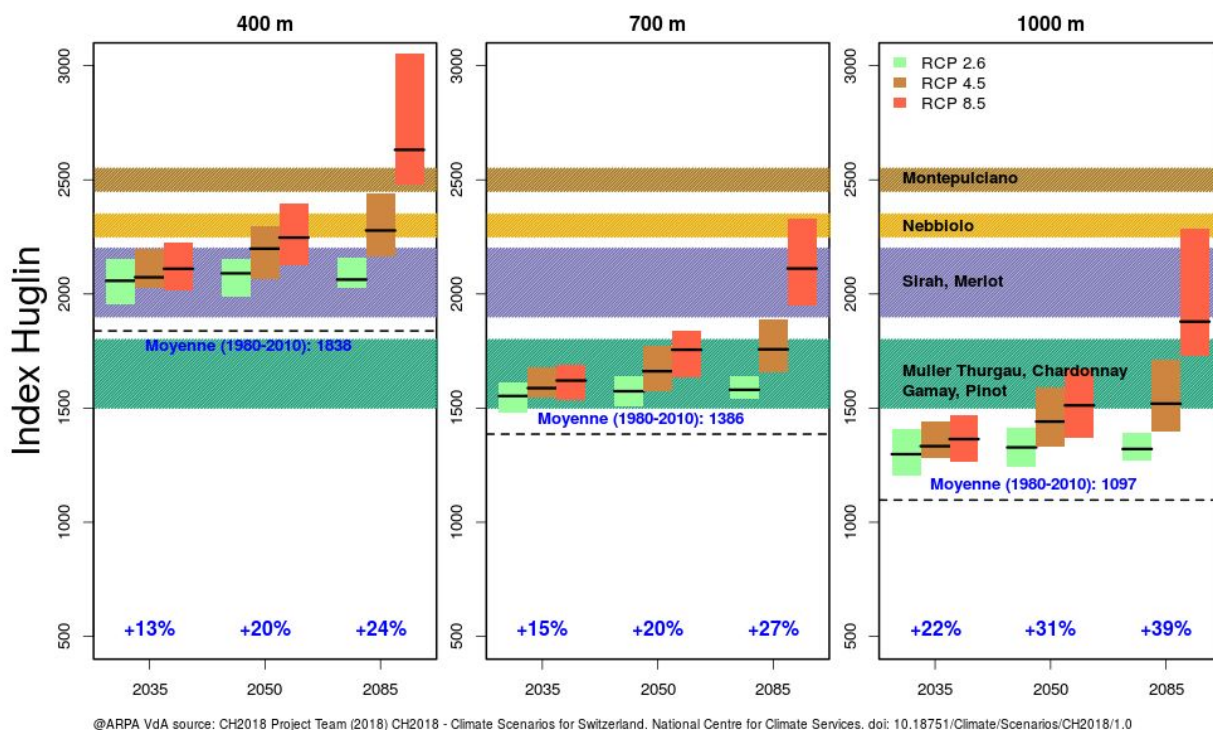


Figure 3.6. Scénarios d'évolution de l'indice de Huglin a 400, 700 et 1000 m. La couleur des barres représente les valeurs de l'indice pour différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés. La ligne horizontale noire discontinue représente les valeurs de l'indice de référence pour la période 1980-2010. Les rectangles colorés représentent les valeurs optimales de l'indice pour certains cépages.

A 400 m et dans le futur plus proche (2035) on aura des conditions trop chaudes pour des cépages ayant besoin d'une chaleur modérée (i.e. "froids") comme le Chardonnay, le Muller Thurgau le Gamay et le Pinot. En revanche les conditions climatiques deviendront idéales pour le Syrah et le Merlot; à partir de 2050 on aura des conditions potentiellement optimales pour des nouveaux cépages typiques de climats plus chaudes comme le Nebbiolo et le Montepulciano. À plus haute altitude (700 m) en 2035 sont prévues des conditions bio-climatiques idéales pour les vignobles "froids" mais aussi pour le Syrah et le Merlot à la fin du siècle. A 1000 m, de nouvelles opportunité de culture des cépages "froids" émergent à partir de la moitié du siècle. En conclusion, la culture de la vigne dans l'EMB pourra profiter du réchauffement climatique : l'augmentation des températures pourrait permettre **aux viticulteurs d'implanter une plus large gamme de variétés de vignes, potentiellement sur des versants plus hauts**, ce qui n'est pas possible avec le climat actuel.

Cependant, il faut aussi considérer que si le réchauffement suit le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5), des impacts négatifs liés au stress thermique, à la sécheresse ou aux événements extrêmes pourront avoir lieu, surtout à basse altitude. L'interprétation des résultats présentés doit aussi tenir compte du fait que l'indice d'Huglin est calculé à partir des scénarios climatiques à l'échelle du territoire, et ne permet pas d'évaluer les conditions bio-climatiques à très petite échelle comme par exemple l'effet de versants ensoleillés, ou les phénomènes d'inversion thermique qui peuvent jouer un rôle non-négligeable, de même que les conditions pédologiques et la fertilité des sols, qui sont tous déterminants pour évaluer la viabilité des différents cépages.

Gelées tardives

Les gelées tardives sont un exemple d'un aléa climatique qui peut avoir un impact très fort sur l'agriculture de montagne. L'année 2017 a fourni un témoignage très clair de ces effets : un printemps (mars et avril) doux et précoce a conduit à un débourrement et une floraison précoce des arbres, de l'ordre de plusieurs semaines (Figure 2.9); le 10 avril une gelée tardive a provoqué des dégâts très importants sur les jeunes feuilles et fleurs de ces espèces, menant à des pertes de productivité de l'ordre du 70-80% en Vallée d'Aoste et en Valais.

Nous avons retenu l'indicateur "marge de sécurité" (*safety margin*) pour rendre compte de la vulnérabilité des cultures de l'EMB au gel tardif. Cet indicateur établit le nombre de jours entre le dernier jour de gel et la date de débourrement ou de floraison des espèces. Une marge de sécurité (*safety margin*) positive indique que le débourrement ou la floraison suivent la date du dernier jour de gel, tandis qu'une marge de sécurité négative indique que le dernier jour de gel a lieu après le début du développement de la végétation, impliquant donc des dégâts potentiels sur les cultures.

L'évolution du risque de gelées tardive avec le changement climatique est un sujet de recherche en cours. Il est d'une part montré que, dans les dernières décennies en Suisse (1975-2016), au-dessus de 800 m d'altitude, le risque de gelées sur les arbres fruitiers a augmenté de 20% à 40% (Vitasse et al., 2018), mais d'autre part que les gelées tardives en haute montagne (>2000 m) n'ont, elles, pas augmenté pendant les dernières décennies (Klein et al., 2018). L'hypothèse avancée est que la baisse de l'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. Pour autant, Vitasse et al. (2018) soulignent que l'avancée du printemps pourra être limitée par l'effet conjoint de la photopériode* (i.e. qui limitera le développement de la végétation si la longueur du jour n'est pas encore suffisante) et d'une accumulation insuffisante de froid (*chilling requirement*) pendant l'hiver. Le fait que le développement printanier des plantes soit ralenti par ces deux facteurs pourrait réduire le risque des gelées tardives.

Afin de modéliser ce phénomène à l'échelle de l'EMB, nous avons calculé la marge de sécurité (*safety margin*) actuelle et future pour des espèces d'arbres fruitiers représentatifs. Différents modèles phénologiques, qui incluent le rôle du facteur froid en hiver (*chilling requirement*) (Hufkens et al., 2018), ont été optimisés grâce aux données phénologiques et météorologiques observées par MétéoSuisse dans les dernières décennies (source: MétéoSuisse), afin de définir le modèle plus précis pour calculer la marge de sécurité actuelle pour deux espèces (cerisier et pommier). Avec la même approche, les scénarios de marge de sécurité futurs ont été calculés pour deux altitudes.

La Figure 3.7 montre l'impact prévu de ces phénomènes complexes pour l'exemple du pommier : pour la période de référence (1980-2010) à 400 m d'altitude, la marge de sécurité moyenne était de plus de 20

jours et des gelées tardives n'ont eu lieu que dans 7 % des années (axe de droite sur le graphique). À 700 m, la marge de sécurité pour la période de référence est de moins de 5 jours, ce qui se traduit par une occurrence de gelée tardive de 35 % des années. Les scénarios futurs prévoient que la marge de sécurité va augmenter, en 2035 à 700m et en 2050 plus bas et que **le risque de gelées tardives du pommier pourrait être presque constant à 400m (du 7% au 5-7% en fonction des scénarios) et pourrait même se réduire à 700 m (du 35 % au 24 % à la fin du siècle).**

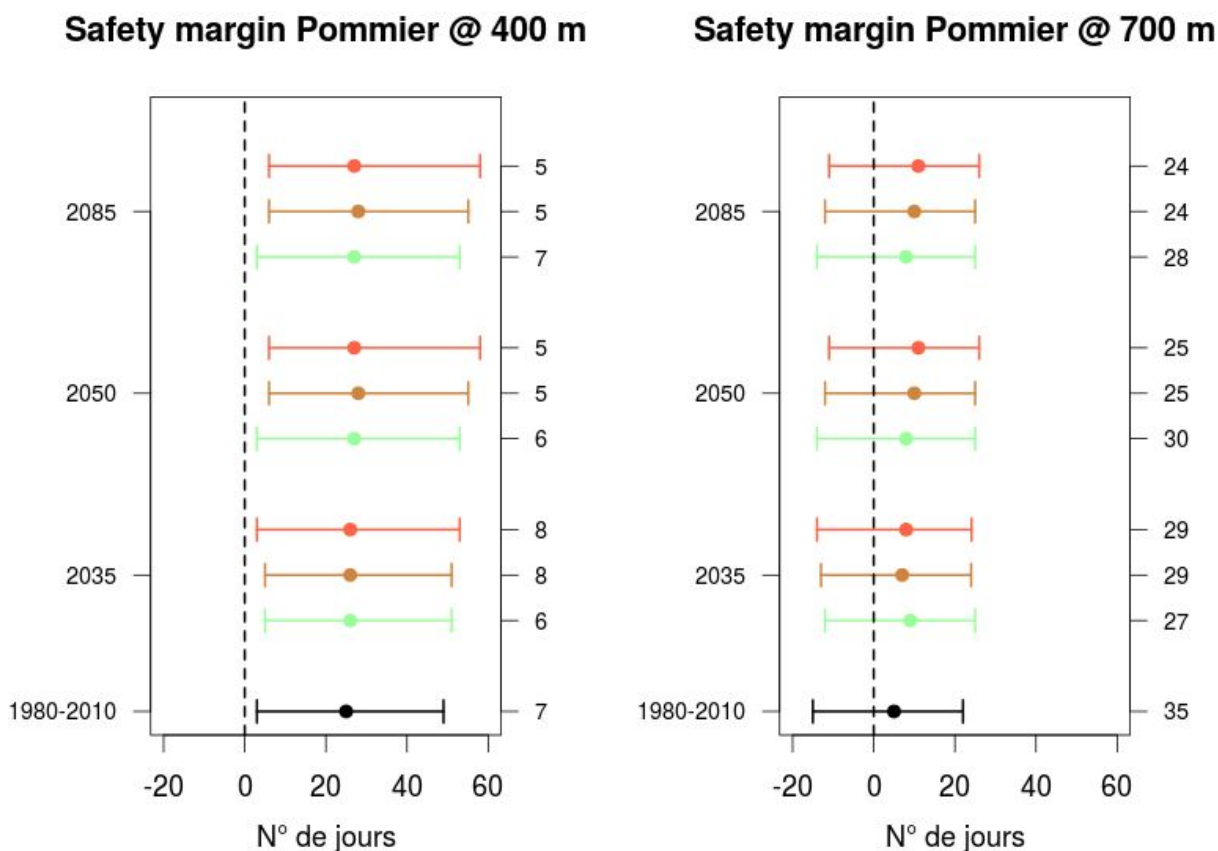


Figure 3.7. Scénarios d'évolution de la marge de sécurité pour le risque de gelées tardives du pommier à 400 et 700 m. Les lignes horizontales représentent la variabilité de cette marge observée actuellement et prévue pour le futur (quantile 10, quantile 90) ; le point central indique la médiane. La couleur des lignes représente les différents scénarios climatiques (vert RCP 2.6, marron RCP 4.5 et rouge RCP 8.5). La ligne noire représente la période de référence actuelle. Sur l'axe de droite figurent le pourcentage d'années avec gelées tardives pour la période de référence.

Des résultats similaires ont été obtenus pour le cerisier (Figure 3.8). Le cerisier est une espèce plus précoce et sa marge de sécurité est donc plus faible que pour le pommier. Il est donc plus exposé au risque de gelées tardives. Dans la période de référence (1980-2010), à 400 m la marge de sécurité était de moins de 20 jours et des gelées tardives ont eu lieu dans 15 % des années (chiffres à droite du plot). À 700 m, la marge de sécurité moyenne actuelle est proche de zéro, ce qui implique que des gelées tardives pour le cerisier peuvent avoir lieu plus d'une année sur deux (55%). **Les scénarios futurs pour le cerisier prévoient que ce risque pourra diminuer dès 2035 à 400m et à 700m, tout en restant plus élevé que pour le pommier.** En considérant tous les scénarios et toute la période de référence, la réduction du risque la plus forte est attendue à 700 m (de 55 % à 38 % pour la fin du siècle).

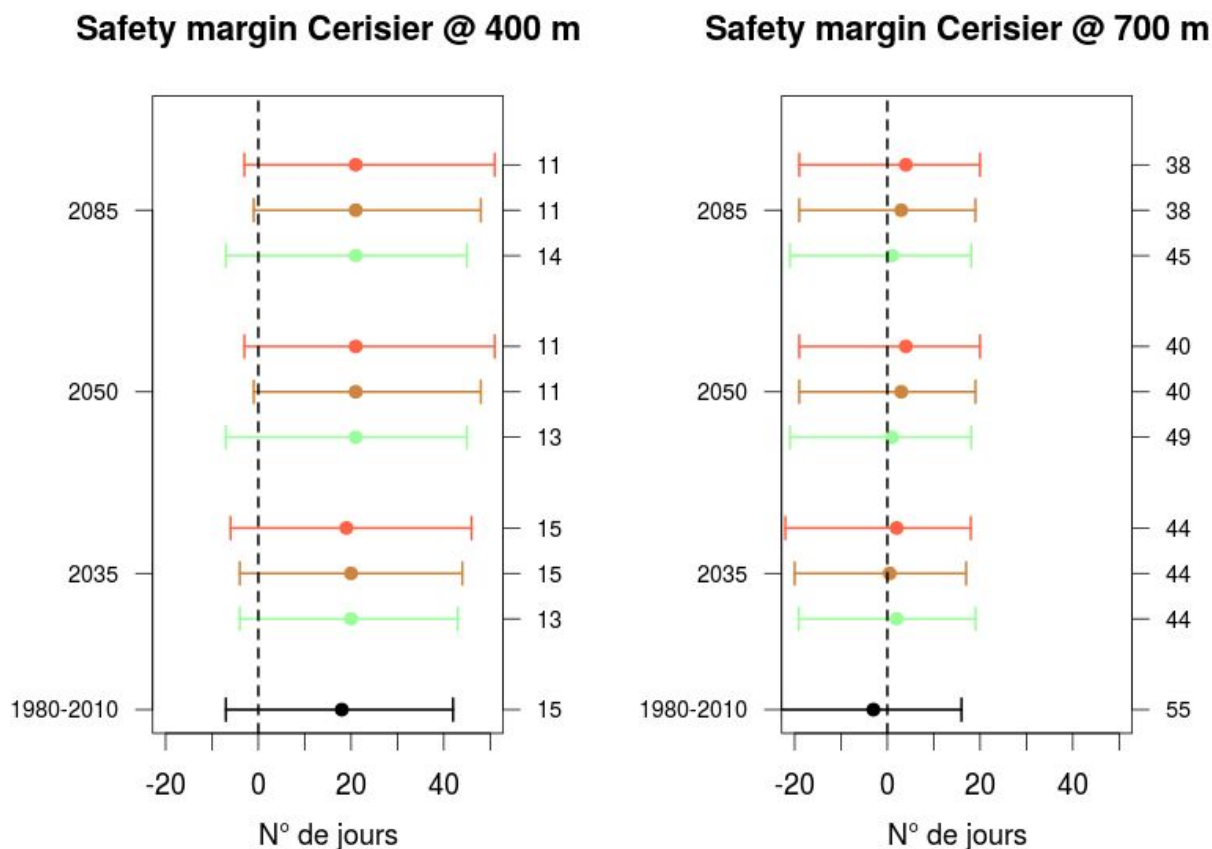


Figure 3.8. Scénarios d'évolution de la marge de sécurité pour le risque de gelées tardives du cerisier à 400 et 700 m. Les lignes horizontales représentent la variabilité de la marge de sécurité observée actuellement et prévue pour le futur (quantile 10, quantile 90); le point central indique la médiane. La couleur des lignes représente les différents scénarios climatiques (vert RCP 2.6, marron RCP 4.5 et rouge RCP 8.5). La ligne noire représente la période de référence actuelle. L'axe de droite indique le pourcentage d'années avec des gelées tardives pour la période de référence.

Les gelées tardives pourront être un aléa important aussi pour les ressources pastorales : avec la fonte précoce de la neige, les prairies pourront se développer plus tôt au printemps, mais avec un risque d'être exposées au gel qui dégrade à la fois la qualité et la quantité des ressources (Chaix et al., 2017). Aucun relevés phénologiques de terrain ne sont disponibles pour évaluer l'évolution du risque de gelées tardives des prairies. Les dates de développement de la végétation ont donc été extraites pour les fonds de vallée à partir d'images satellite (MODIS (2002-2018), Filippa et al., 2017). Les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus pour le pommier et le cerisier (Figure 3.9). La marge de sécurité actuelles est plus basse à 700 m (moins de 5 jours) qu'à 400m (plus de 20 jours). Le risque de gelées est donc plus grand à cette altitude (38 % par rapport au 7 % à 400m). Les scénarios futurs prévoient que ce risque pourra diminuer dès 2035 et que en fin du siècle le risque sera de 3-4 % à 400m et 17-25 % à 700 m.

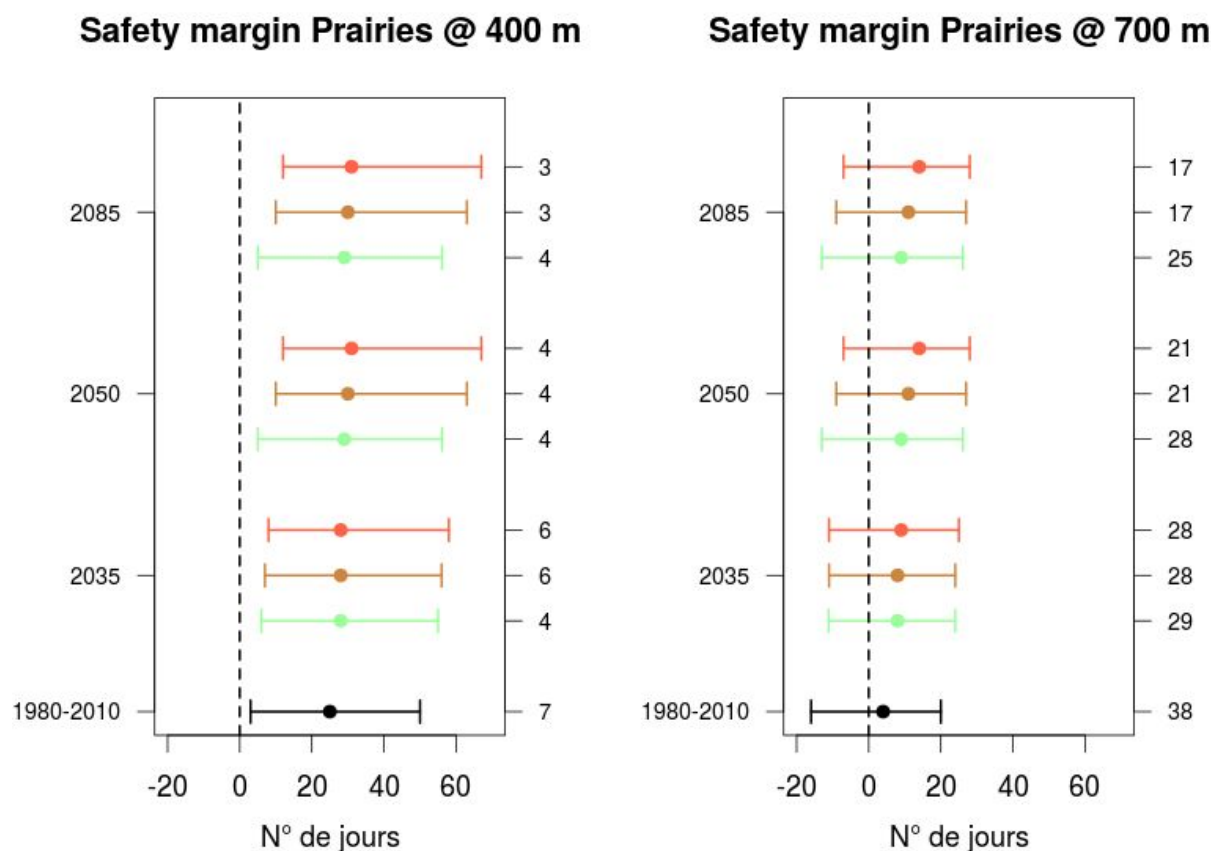


Figure 3.9. Scénarios d'évolution de la marge de sécurité pour le risque de gelées tardives des prairies à 400 et 700 m. Les lignes horizontales représentent la variabilité de la marge de sécurité observée actuellement et prévue pour le futur (quantile 10, quantile 90) ; le point central indique la médiane. La couleur des lignes représente les différents scénarios climatiques (vert RCP2.6, marron RCP4.5 et rouge RCP8.5). La ligne noire représente la période de référence actuelle. L'axe de droite indique le pourcentage d'années avec gelées tardives pour la période de référence.

En conclusion, les analyses présentées suggèrent une tendance générale à la **réduction du risque de gelées tardives** pour les trois cultures considérés, réduction qui sera plus forte à 700 m. Les limites principales de cette analyse et qui militent pour des études plus approfondies à l'avenir sont :

- des bases de données phénologiques parcellaires : non disponibles pour certains milieux, ne tenant pas compte des différences entre variétés, et limitées à la Suisse pour le cerisier et le pommier
- le fait que c'est la phase du 50% de floraison (pour les arbres) et de fin de croissance (pour les prairies) qui a été prise en compte. L'analyse des phases de début de floraison pourrait avoir conduit à des résultats différents et est un des premiers étude supplémentaires à faire
- la potentielle variabilité génétique au sein des mêmes espèces poussant à différentes altitudes, qui pourrait induire des réponses adaptées au risque de gel tardif à chaque altitude (Vitasse et al., 2018). Enfin les modèles phénologiques n'ont pas été optimisés en séparant les population au deux niveaux altitudinaux et donc les résultats obtenus peuvent négliger l'effet d'adaptation génétique des différentes populations, même si cet effet est surement secondaire par rapport au contrôle environnemental .

Stress pour les vaches laitières

L'augmentation des températures estivales peut induire des situations de stress pour les vaches laitières, qui impactent ensuite les rendements. Ce type de stress peut être estimé avec l'indice THI (temperature-humidity index, Thom 1958) qui considère l'effet conjoint de la température et de l'humidité de l'air sur le confort thermique des animaux; des conditions de stress thermique se traduisent par une réduction de la qualité et de la quantité du lait produit. Aujourd'hui, les vaches peuvent être en situation de stress (seuil de THI > 72) 1 jour par an en moyenne dans les fonds de vallée (Figure 3.10). **Le nombre de jours de stress pourrait être de 5 à 12 jours en 2035, 5 à 20 en 2050 et 5 à 60 à la fin du siècle, entraînant des effets importants sur la production laitière des troupeaux qui restent dans les fonds de vallée pendant l'été.** Il sera potentiellement nécessaire de mettre en place des mesures d'adaptation dans la gestion des troupeaux (par exemple monter plus haut et plus tôt en altitude), afin d'optimiser les régimes thermiques et alimentaires des vaches face aux étés caniculaires (CH2014-Impacts, 2014). La qualité des ressources fourragères est aussi un facteur important qui pourra influencer la quantité et la qualité du lait produit; on peut donc prévoir qu'en lien avec les années de sécheresse, la production laitière pourra être réduite. En conclusion on peut affirmer que dans les fonds de vallée, **le nombre de jours ou les vaches laitières seront en stress à cause de la chaleur va augmenter, entraînant une baisse des rendements laitiers.**

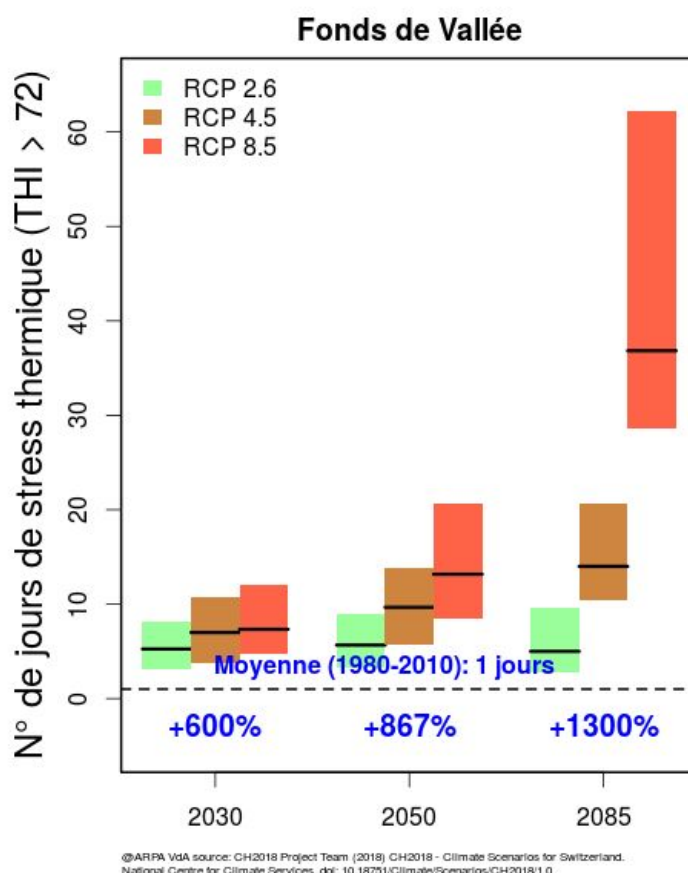


Figure 3.10. Variation du stress thermique pour les vaches (THI index). La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés.

En lien direct avec les cas d'études présentés, un des défis les plus importants sera lié au changement de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes (vagues de chaleur, sécheresses, précipitations

extrêmes, cf. 1.3) qui augmentera les risques d'impact sur la productivité des différentes cultures. Dans ce contexte les politiques d'adaptation devront se concentrer sur la gestion de ces risques avec, par exemple, l'optimisation et la diffusion des pratiques d'irrigation, la gestion des conflits d'usage de l'eau et éventuellement la diffusion d'instruments d'assurances (CH2014-Impacts, 2014).

3.3 Forêts

Fortement influencées par les conditions climatiques et les activités humaines, les forêts de montagne sont très sensibles aux changements en cours qui sont en train de modifier leur fonctionnement en termes de physiologie, croissance, distribution, interactions avec les pathogènes et exposition aux perturbations (tempêtes, incendies, ...). Il est important de signaler que la forêt rend de nombreux services aux populations humaines en zone de montagne, tels que la production de bois, la régulation du cycle de l'eau, le stockage du CO₂ (puits de carbone), la conservation d'une biodiversité importante, et la protection contre les chutes de pierre, les crues torrentielles et les avalanches. Cependant **l'efficacité de ces services est remise en cause avec le changement climatique : les événements extrêmes comme les incendies, les sécheresses ou les tempêtes impactent la survie des arbres et donc les services écosystémiques qu'ils rendent aux populations humaines** (Elkin et al., 2013; Linder et al. 2010).

Il est donc nécessaire d'essayer de comprendre comment les forêts pourront s'adapter et répondre aux changements climatiques. L'analyse complète de tous les impacts (e.g. stress, mortalité, distribution des espèces, ...), risques et opportunités (modification de la production de bois, réduction de l'effet de protection, incendies, ...) liés aux changements climatiques sur les forêts est au-delà des objectifs et des possibilités de ce rapport. Nous nous concentrons donc sur quelques processus clés : **modification de la distribution des espèces, remontée de la limite de la forêt, augmentation de la biomasse produite et risque de pullulation de parasites et de maladies attaquant les arbres.**

Modification de la composition des peuplements forestiers

Les conditions climatiques des milieux forestiers vont être modifiées avec d'une part l'allongement de la période de croissance en lien avec l'augmentation des températures printanières et automnales et d'une autre part une intensification des sécheresses. Certaines espèces d'arbres ne pouvant pas suffisamment migrer ni s'adapter pourront disparaître localement et être remplacées par de nouvelles espèces arrivant des étages inférieurs. En-dessous de 1500 m d'altitude, les simulations des dynamiques des peuplements forestiers prévoient **la remontée et le développement du hêtre, de l'érable et du sorbier**. D'autres d'espèces thermophiles (aimant la chaleur) comme **le pin sylvestre, pourraient progressivement remplacer les peuplements d'épicéas à basse altitude**. Déjà défavorisé par le réchauffement, L'épicéa est particulièrement sensible à la sécheresse, aux tempêtes de vent (notamment dans les peuplements de même âge et monospécifiques) et aux pathogènes. On peut donc s'attendre à une mortalité accrue des épicéas sur la limite basse de leur distribution dans l'EMB dans les années à venir.

Au niveau de la limite supérieure de la forêt, les effets du changement climatique seront variables en fonction de l'espèce. Les épicéas vont trouver en 2050 des conditions plus favorables pour leur développement plus haut en altitude et sur la limite supérieure de leur distribution. Les aulnes verts continueront à coloniser les milieux difficiles d'accès, par exemples les couloirs d'avalanche et les alpages abandonnés en terrain raide (Anthelme et al., 2007). A plus long-terme, les pins cembro et les pins mugo pourront se développer et occuper plus de surface par rapport à aujourd'hui, notamment dans les

éboulis et les falaises. Au-dessus des forêts d'épicéa, le mélèze va se développer et coloniser les milieux où il n'y a encore pas d'espèces arbustives (Schumacher et Bugmann, 2006).

Remontée de la limite de la forêt

L'augmentation des températures entraînant une saison végétative plus longue en altitude (cf. 2.5), conjuguée à des hivers plus doux mais restant suffisamment froids pour apporter aux arbres le froid nécessaire à leur cycle phénologique (*chilling factor*), les arbres trouvent des conditions favorables pour s'implanter plus haut en altitude. **Dans le massif du Mont-Blanc, l'altitude médiane de la forêt est remontée de 60 m entre 1952 et 2006** (Martin, 2014), et **les simulations prévoient une remontée supplémentaire qui pourra atteindre 100 m en 2050** selon la configuration des milieux (Schumacher et Bugmann, 2006). En revanche, l'augmentation des températures seule ne permet pas d'expliquer cette remontée dans le massif : **l'abandon du pastoralisme et la fonte des glaciers accélèrent ce phénomène** en découvrant de nouvelles surfaces disponibles pour la colonisation. La remontée de la forêt n'est cependant pas un phénomène homogène : l'orientation des versants peut faire varier la limite altitudinale de 200 m d'altitude, comme c'est le cas dans les Alpes suisses (Schumacher et Bugmann, 2006). Cette limite varie en fonction du type de sol, et des obstacles rocheux, ainsi que des perturbations locales comme les avalanches et l'activité pastorale. A long-terme, le développement des forêts d'altitude seront une protection supplémentaire contre les glissements de terrain, les chutes de pierre et les avalanches (Lindner et al., 2010), mais vont considérablement modifier les paysages. Dans le massif du Mont-Blanc, certaines zones pourraient voir disparaître leurs pelouses alpines au profit de la forêt, modifiant fortement l'aspect des montagnes avec des répercussions sur le tourisme et les activités locales (cf. 3.5).

Les Figures 3.11 et 3.12 montrent des exemples de scénarios d'évolution de la distribution des écosystèmes autour du Mont-Blanc basée sur l'extrapolation de la dynamique observée de la végétation ces dernières années (1987-2017) dans le futur, à l'horizon 2050. Nous avons utilisé un indice de la productivité végétale, le NDVI, calculé à partir des images satellitaires Landsat*. Les extrapolations tiennent compte de la dynamique locale de la végétation observée par satellite, mais ne tiennent ni compte des scénarios climatiques (elles prennent pour hypothèse une dynamique égale dans le futur à celle observée dans le passé) ni de changements des activités humaines (, intensité de pâturage...). Néanmoins cette méthode permet de générer des tendances pour les paysages futurs, plutôt conservatrices étant donné l'accélération du changement climatique dans les années à venir et des impacts non-linéaires liés à la complexité des systèmes naturels. Le recul glaciaire, qui va libérer de nouveaux espaces pour la colonisation végétale, n'est pas non plus incorporé dans ces projections car les modélisations du recul glaciaires futurs ne sont pas disponibles à l'échelle du massif. Les Figures 3.11 et 3.12 montrent les modifications des écosystèmes attendues **pour 2050 : la remontée des forêts et des arbustes est très évidente dans les versants sud, ainsi que l'augmentation de la surface occupée par les prairies, landes et pelouses qui vont continuer à coloniser les milieux aujourd'hui rocheux et enneigés**. Nous nous attendons également à une densification des forêts montagnardes, sauf si l'activité pastorale regagne en intensité, notamment dans les secteurs de Megève et des Contamines.

CHANGEMENTS DE VEGETATION à l'horizon 2050

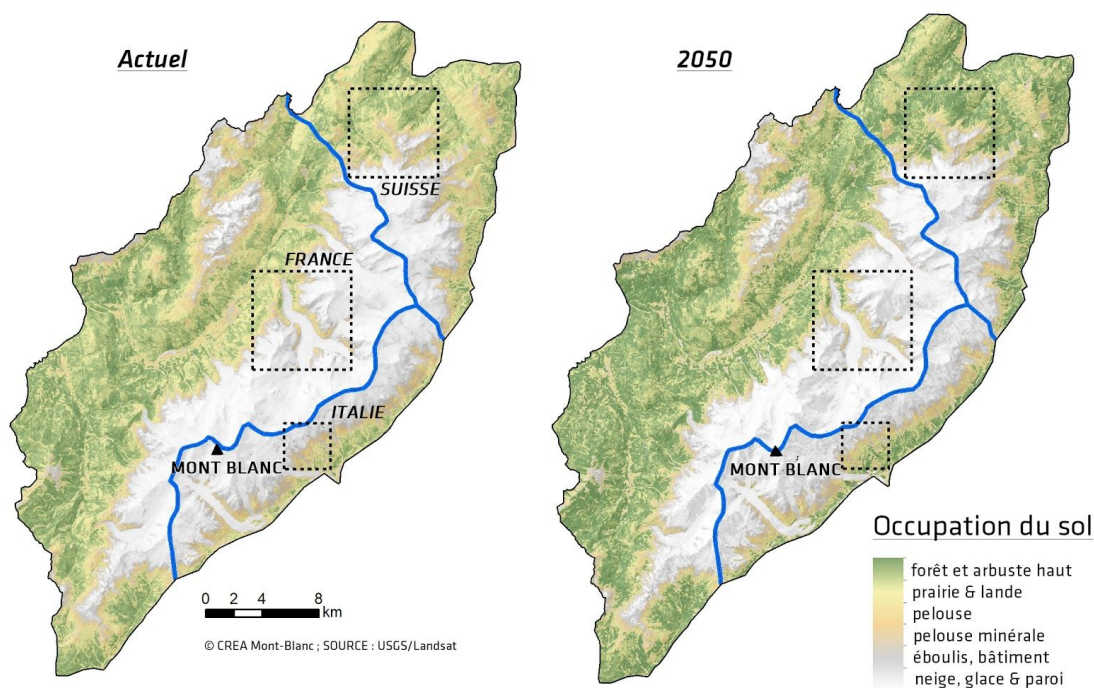


Figure 3.11. Cartes des habitats du massif du Mont-Blanc pour la période actuelle et en 2050, basées sur un indice de productivité végétale (le NDVI) détecté par satellite entre 1984 et 2017 et extrapolé pour le futur (avec un modèle linéaire calibré par pixel). Dans l'échelle du couleur, plus le vert est foncé plus la couverture et la productivité végétale sont importantes. Les rectangles indiquent des zooms illustrés dans la figure suivante (46).

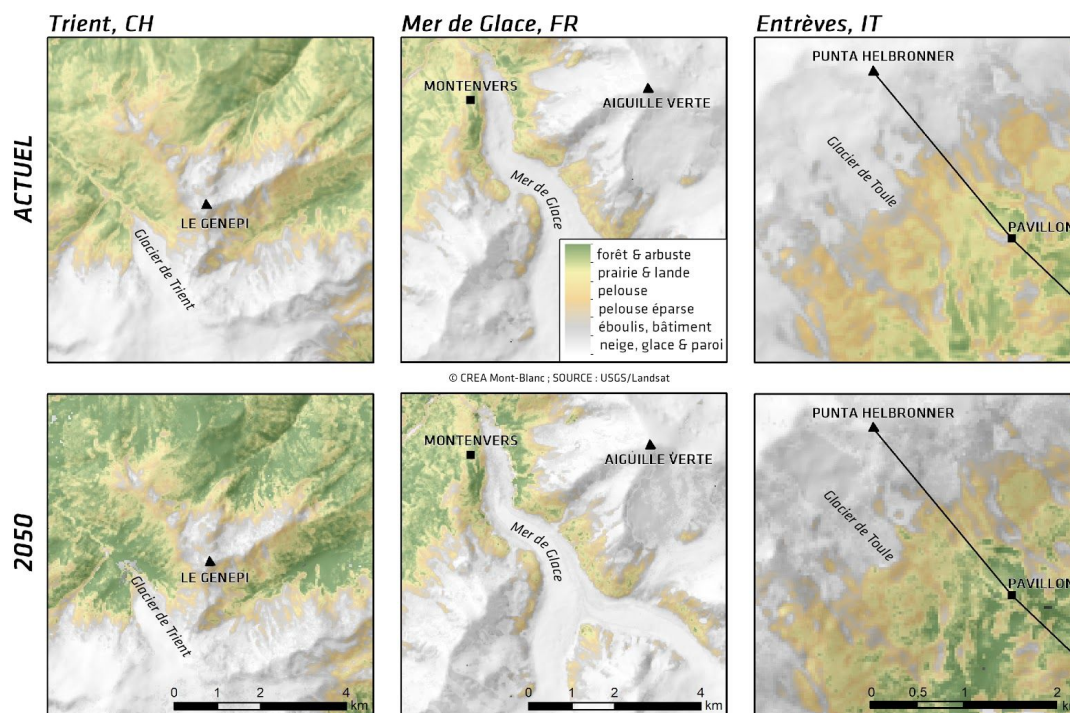


Figure 3.12. Zooms sur différents secteurs en Suisse (Trient), France (Chamonix) et Italie (Entrèves) indiquant les changements de végétation prévus entre la période actuelle et 2050. A Trient, on peut distinguer une forte densification et une remontée de la forêt et des arbustes, notamment dans les zones d'éboulis de haute montagne. Au niveau du site du Montanvers, on peut remarquer une expansion de la forêt à la fois en moyenne montagne et au niveau de la langue terminale de la Mer de Glace. Enfin sur le versant italien on voit que la forêt est susceptible de dépasser la gare intermédiaire du Skyway au Pavillon.

Augmentation de la surface et la productivité des forêts de montagne

En zone de montagne, où les températures froides constituent un frein à la croissance des arbres, la production de biomasse va probablement augmenter grâce au réchauffement, entraînant une production de biomasse accrue et une densification des peuplements (Schumacher et Bugmann, 2006). L'allongement de la période de végétation, l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique disponible pour la photosynthèse et les dépôts azotés liés aux activités humaines vont aussi accélérer cette production primaire. La croissance plus rapide des arbres pourra profiter à la sylviculture, mais à condition que les gestionnaires forestiers privilégient la diversité d'essences et surveillent les peuplements ainsi que l'arrivée des parasites, pour abattre les arbres dès qu'ils sont contaminés (Courbaud et al., 2010).

La Figure 3.13 montre l'évolution de la surface forestière du massif du Mont-Blanc, observée depuis les années 1950 (par photographie aérienne) et projetée à l'horizon 2050 (en utilisant la méthode d'extrapolation décrite ci-dessus). On peut envisager une claire augmentation de la surface occupée par **la forêt, qui passe de 90 km² dans les années 1950 à 230 km² prévus pour 2050, et ceci principalement sur les versants suisses et français du massif**. Cette dynamique s'est déjà traduite par un accroissement observé d'environ 85% de la superficie forestière entre 1952 et 2006 dans le massif, à la fois en lien avec le réchauffement climatique mais surtout en fonction de la déprise agricole très marquée durant ces années (Martin, 2014). Ce gain en surface et en productivité des forêts constituera un important puits de stockage de carbone, mais entraînera également une modification majeure des paysages de l'EMB, avec des conséquences esthétiques, culturelles et potentiellement touristiques (cf.3.5).

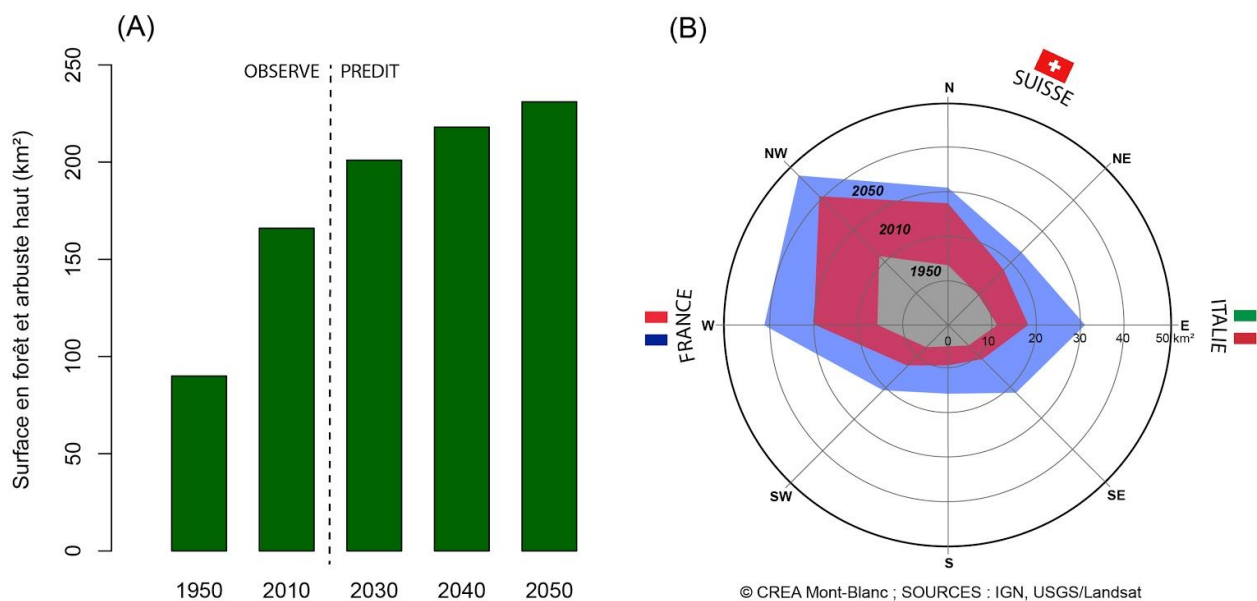


Figure 3.13. (A) Evolution de l'aire de la forêt dans le massif du Mont-Blanc entre 1950 et 2050 et (B) répartition de l'aire de la forêt par orientation de pente, et ceci estimé pour le cœur du massif indiqué dans la Figure 45. L'aire de la forêt et des arbustes hauts risque d'augmenter par environ 60 km² entre aujourd'hui et 2050. Les résultats pour 1950 et 2010 sont basés sur des photographies aériennes, tandis que les estimations pour la période 2015-2050 sont issues de l'analyse des images satellitaires.

Risque de pullulation de parasites et de maladies attaquant les arbres

Contrant ce potentiel d'expansion de surfaces boisées, particulièrement pour certaines espèces sensibles, l'augmentation des températures pourra bénéficier certains parasites et maladies qui vont pouvoir se propager et se reproduire plus rapidement sur les arbres (Rebetez et Dobberty, 2004). C'est par exemple 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, ils se développent 3 fois plus vite à 30°C qu'à 15°C (Wermelinger and Seifert, 1999), et menacent de produire une génération supplémentaire à chaque saison estivale (CH2014-Impacts, 2014). **Pendant l'été caniculaire de 2003, les scolytes ont pu développer 3 générations et détruire l'équivalent des 2/3 de la consommation annuelle suisse de résineux, situation qui pourrait affecter l'EMB plus fréquemment à l'avenir.** Dans l'EMB, les scolytes sont présents et ont déjà causé des dégâts en 2014 et 2015, des attaques de plus grande ampleur sont à prévoir dans les années à venir. Un autre exemple est représenté par la tordeuse du mélèze qui pourra modifier sa distribution spatiale avec l'augmentation des températures. C'est un papillon dont la chenille s'attaque aux aiguilles des mélèzes, mais ne provoque que rarement la mort de l'arbre, même lors d'une défoliation complète. En revanche, les mélèzes attaqués sont affaiblis et produisent 50 % à 90 % de bois en moins. Ils sont alors plus vulnérables aux événements extrêmes du climat et aux attaques d'autres parasites. La tordeuse, qui pullule en cycles de 8 à 10 ans, va pouvoir se développer plus en altitude (Saulnier et al., 2017). Ce processus est un cercle vicieux, les arbres attaqués étant affaiblis et moins en mesure de faire face aux sécheresses suivantes (Barros et al., 2016), mais aussi aux nouvelles attaques de parasites et de maladies (Rebetez et Dobberty, 2004).

3.4 Patrimoine naturel, conservation et biodiversité

Les zones de montagne hébergent près de la moitié des points chauds (ou "hotspots") de la biodiversité dans le monde (Kohler et Maselli, 2009), et sont caractérisées par une **biodiversité exceptionnelle sur des zones peu étendues** : les montagnes (au-dessus de la limite de la forêt) concentrent 25% des espèces végétales européennes, sur seulement 3% de la surface du continent (Chape et al. 2008). L'isolement et la distance géographique entre ces "îles dans le ciel", croisés avec des périodes glaciaires et interglaciaires, ont contribué à un **fort taux d'endémisme chez les espèces de montagne** (10% pour la flore alpine comparée à 4% en moyenne pour la flore européenne; Aeschmann et al., 2011). C'est ainsi que les Alpes, et l'EMB notamment, hébergent des espèces emblématiques patrimoniales comme le lièvre variable, le lagopède alpin, le chamois ou le bouquetin, et les plantes de haute montagne (silène acaule, renoncule des glaciers et bien d'autres). **Outre des enjeux de conservation de chacune de ces espèces, l'évolution de ces populations est aussi le marqueur de l'évolution des écosystèmes alpins en général**, de nos paysages et de l'imaginaire alpin plus largement.

Or ces écosystèmes sont très vulnérables aux changements globaux tel que les changements climatiques et les perturbations liées aux activités humaines. Selon les scénarios d'évolution du climat, les espèces animales et végétales seront plus ou moins impactées par les modifications et les pertes de leur habitat. Les espèces vont migrer, s'adapter aux nouvelles conditions ou potentiellement s'éteindre localement (Figure 3.14). **Ces changements seront les plus importants autour de 2000 m d'altitude**, où la distribution de 50% des oiseaux et de 40% des plantes sera modifiée (CH2014-Impacts, 2014). Dans les sections suivantes, les principaux processus qui pourront impacter la biodiversité de l'EMB sont analysés

(ces processus sont schématisés dans la Figure 3.14). Ceci entraînera nécessairement un besoin d'adaptation des stratégies de gestion des espaces naturels dans l'EMB.

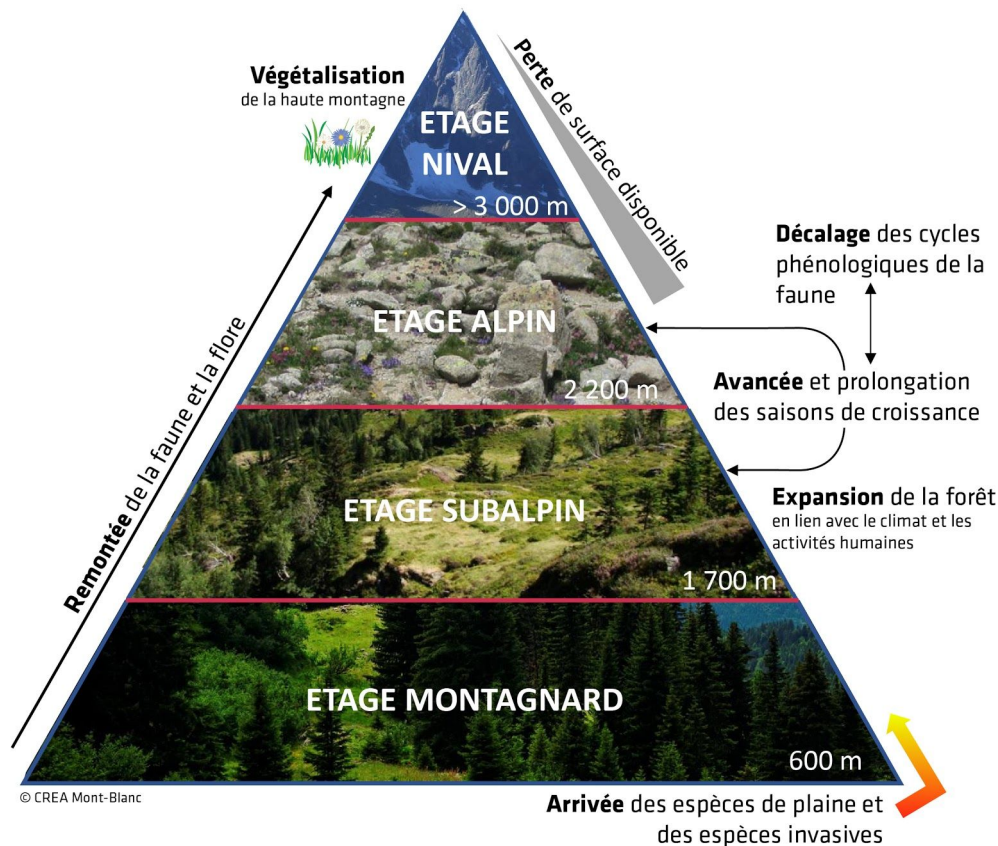


Figure 3.14. Schéma des changements en cours de la biodiversité sur les gradients d'altitude de l'EMB, en termes de diversité et phénologie. Les altitudes indiquées sont approximatives et désignées en fonction de l'étagement actuel de la végétation, qui risque d'être fortement modifié dans les années à venir.

Impact sur la flore : remontée des espèces

Avec le réchauffement climatique, les espèces végétales migrent vers les limites supérieures de leur habitat naturel, voire au-dessus (Steinbauer et al., 2018). C'est le processus de thermophilisation. A l'étage montagnard (600 - 1700 m), les plantes vont continuer à migrer vers la limite de la forêt et les étages supérieurs (Erschbamer et al., 2011). Les écosystèmes de moyenne montagne sont aussi transformés par l'arrivée de plantes plus compétitrices et potentiellement invasives de fond de vallée (Pauchard et al., 2009). De même, les espèces végétales de l'étage subalpin (1700-2200 m) se développeront de plus en plus haut et atteindront le bas de l'étage alpin (e.g. Pauli et al., 2007), en conséquence directe du réchauffement climatique (Gottfried et al., 2012; Steinbauer et al., 2018). Entre les étages subalpin et alpin (2200-3000 m), la remontée des espèces végétales subalpines va créer une compétition pour l'espace et les ressources (Gottfried et al., 2012). Les espèces alpines vont potentiellement accumuler ce qu'on appelle une dette climatique (*extinction debt*), c'est-à-dire un retard ou une incapacité d'adaptation aux modifications du milieu (Dullinger et al., 2012). À haute altitude (> 3000 m), les conditions deviennent plus clémentes pour les espèces alpines et nivales qui se développent et colonisent les sommets alpins. Une étude réalisée dans le Parc national des Ecrins montre que l'indice de végétation (NDVI), mesurant la productivité végétale des milieux (c'est à dire la production de biomasse), a augmenté sur plus de la moitié de la surface du parc entre 2000 et 2015 et

surtout sur les milieux rocheux au-dessus de 2500m d'altitude (Carlson et al., 2017). De même en Suisse sur le Piz Linard (3 410m), où, pour 75% des espèces étudiées, le nombre d'individus a augmenté depuis 1835 (Wipf et al., 2013).

De manière générale la prolongation de la période sans neige et l'augmentation des températures favorisent la remontée des espèces et la production de biomasse des plantes de montagne (Choler et al., 2015). En revanche, ces plantes, et notamment celles des alpages, sont sensibles aux événements extrêmes. Lorsque des vagues de chaleurs sont associées à une baisse des précipitations, on observe ainsi un brunissement et un arrêt de la croissance, notamment chez les plantes d'alpage (Corona et al. 2019). A cette altitude, la courte saison végétative (2-3 mois) les empêche en effet de retrouver un état normal après une sécheresse (De Boeck et al., 2016, Cremonese et al. 2017).

Impact sur la flore d'un enneigement réduit

L'épaisseur de la couverture neigeuse, et la période de fonte de la neige au printemps sont des facteurs importants pour les espèces végétales vivant au-dessus de la limite de la forêt. La durée de l'enneigement conditionne notamment la croissance, la phénologie, et la répartition spatiale des plantes alpines (Wheeler et al., 2014; Wipf et al., 2009). Avec le réchauffement climatique, les printemps sont plus précoces et le manteau neigeux moins épais (cf. 2.1). Le prolongement de la saison sans neige, même dans l'étage alpin au dessus de 2300 m, va assouplir les contraintes climatiques agissant sur les plantes : la flore alpine dite "spécialiste" et adaptée à un enneigement long, risque d'être remplacée progressivement par des espèces plus généralistes et compétitrices. Malgré une période de végétation plus longue, **les printemps précoces n'apportent pas que des bénéfices aux végétaux : la fonte de la couverture neigeuse les expose au gel, encore fréquent malgré la hausse des températures** (Wheeler et al., 2014; Wipf et al., 2009). Ces événements de gel tardif surviennent au démarrage de la croissance des plantes après l'hiver, quand les tissus végétaux sont les plus sensibles, et peuvent avoir un impact négatif sur la croissance et la productivité pendant tout le reste de la saison (Galvagno et al., 2013). Les effets du gel sur la croissance des végétaux sont nuancés selon les études, qui montrent que la résistance au gel est un paramètre dépendant des espèces et de leurs adaptations physiologiques : par exemple, la myrtille s'avère sensible au gel tardif tandis que l'azalée naine (*Loiseuluria procumbens*) ne l'est pas (Wipf et al., 2009). Comme discuté précédemment dans la section 3.3, le risque d'exposition au gel tardif peut être atténué par l'augmentation des températures printanières dans un contexte de réchauffement climatique (Wheeler et al., 2014; Wipf et al., 2009; Klein et al., 2018).

Impact sur la diversité et les habitats

Les modifications de conditions climatiques pour les espèces ont une conséquence sur la diversité des paysages.

Paradoxalement, on observe actuellement une **augmentation du nombre d'espèces végétales (ou "enrichissement") au dessus de 2200m**, ce qui est un indice clair des effets du changement climatique (les conditions deviennent favorables pour des plantes venant de plus basse altitude, Steinbauer et al., 2018). Cette étude conduite sur 302 sommets majoritairement dans les Alpes, montre une dynamique 5 fois plus importante sur la période 2007-2016 qu'il y a cinquante ans, correspondant avec l'augmentation récente des températures. **Cette augmentation de la diversité cache cependant un déclin potentiel à venir pour les espèces alpines, au profit de celles des étages inférieurs.** La période de temps entre l'enrichissement et le déclin spécifique va dépendre de plusieurs facteurs comme la longévité et la

capacité compétitive des espèces locales, la capacité de dispersion des plantes venues d'en bas, et la topographie. En effet, la remontée des espèces alpines va être contrainte en altitude par une diminution de la surface disponible due à la forme conique des montagnes (Dullinger et al., 2012; Pauli et al., 2007), et à la présence d'obstacles comme des parois rocheuses ou des glaciers, qui sont nombreux dans le massif du Mont-Blanc. Cependant, les plantes alpines qui pourront bénéficier des nombreux microreliefs de la montagne et de nouveaux espaces libérés par le recul glaciaire (Carlson et al., 2014, Fisher et al. 2019). La conséquence majeure du recul potentiel des plantes spécialistes (de la haute altitude ou des zones enneigées par exemple) et de la remontée des espèces est un **risque de simplification des milieux naturels**, où la diversité des milieux actuellement présents dans le massif pourrait se restreindre (Figure 3.15).

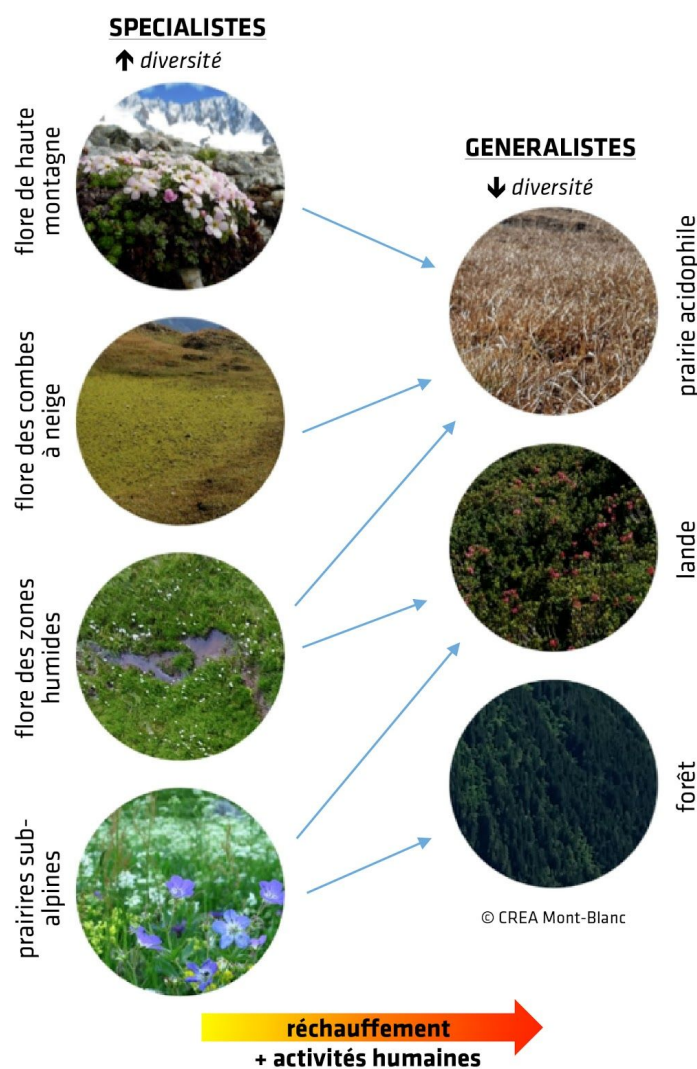


Figure 3.15. Schématisation des transitions possibles de la flore de montagne sur silice dans un contexte de réchauffement climatique. Un enneigement réduit et des températures élevées, croisés avec l'abandon des activités pastorales, peuvent conduire à une "homogénéisation" de la flore alpine, processus dans lequel les espèces spécialistes risquent de se faire remplacer par des plantes plus généralistes et compétitrices. Par exemple, la baisse d'enneigement combinée avec des étés caniculaires risquent d'assécher les zones humides d'altitude, ce qui défavorisera la faune et la flore spécifiques qui sont adaptées à ces milieux. Il est important à signaler que la forte variabilité topographique peut générer localement des "micro-refuges" ayant des conditions toujours favorables pour les espèces alpines, par exemple sur des creux en versant nord, malgré le réchauffement global.

Impacts sur la faune

L'épaisseur et la durée de la couverture neigeuse impactent aussi toutes les espèces animales qui hibernent ou hibernent. Avec le réchauffement climatique, le manteau neigeux plus fin isole moins les terriers du gel. Même si les printemps précoces permettent aux animaux de se réveiller avec plus de réserves corporelles, une étude faite en Vanoise sur la marmotte alpine montre que les conséquences sont néfastes sur leur reproduction : la taille des portées a diminué d'un petit depuis 1990, sur des portées allant de 1 à 7 petits (Tafari, 2013). Des résultats similaires ont été obtenus dans plusieurs études sur le bouquetin dans le Parc National du Grand Paradis (Pettorelli et al., 2007). D'autres espèces risquent d'être impactées par la baisse de la couverture neigeuse, comme le hérisson, le tétras-lyre, les campagnols des neiges ou encore le lagopède alpin (Figure 3.16).

Les animaux de montagne se sont adaptés aux conditions climatiques en synchronisant leurs **cycles phénologiques avec la croissance des plantes et les ressources disponibles, voire aussi avec les conditions d'enneigement**. La mue du lagopède alpin (changement de couleur de plumage), par exemple, qui permet à cet oiseau de mieux se camoufler en fonction de la présence ou l'absence du manteau neigeux, se fait en fonction de la photopériode*. Il est fort probable que la baisse de la durée d'enneigement aura lieu plus rapidement que les capacités d'adaptation de cette espèce, qui risque de se retrouver désynchronisé avec son habitat et plus vulnérable aux prédateurs. Un autre exemple concerne les bouquetins et les chamois. On sait que la qualité de l'herbe est un facteur plus important que la quantité (Garel et al., 2011), mais au printemps, la croissance des plantes et la date de floraison ne sont plus synchronisées avec celle des mises-bas qui arrive plus tard, en fonction de la photopériode et non pas les conditions climatiques. Les mères ont moins de ressources et un lait plus pauvre pour le développement des petits. En été, les sécheresses réduisent les ressources disponibles pour les bouquetins, et les femelles ne sont pas en condition physique optimale pour la période de rut et la gestation. Une étude conduite dans le massif de Belledonne a observé une baisse du succès de reproduction lors des saisons anormalement chaudes précédant la mise-bas. Une autre étude réalisée dans le canton de Ticino (Suisse) et dans le nord du Piémont (Italie), a montré que **la population de chamois et leur masse corporelle ont été fortement réduites après la canicule de 2003. La succession de printemps et d'étés anormalement chauds les ont par la suite empêchés de retrouver leur état corporel initial** (Rughetti et Festa-Bianchet, 2012). Dans le massif des Bauges, les modèles prédictifs estiment une réduction de 20% du taux d'occupation des chamois d'ici à 2100 (Thuiller et al., 2018).

Enfin, la simplification des milieux et la réduction en superficie des milieux froids pourront entraîner **des pertes d'habitat** pour toutes les espèces ayant besoin de milieux froids pour leur développement et leur reproduction. Parmi elles, nous pouvons citer encore le lagopède alpin, qui est actuellement bien présent dans le massif du Mont-Blanc, est une espèce relique des périodes glaciaires. Bien que le réchauffement du printemps a un effet positif sur sa reproduction (Martin et Wiebe, 2004), le changement climatique risque de faire disparaître 60% de son habitat favorable d'ici à 2050, et plus de 90% à la fin du siècle (Figure 3.16, Reverman et al. 2012).

Habitat du lagopède alpin

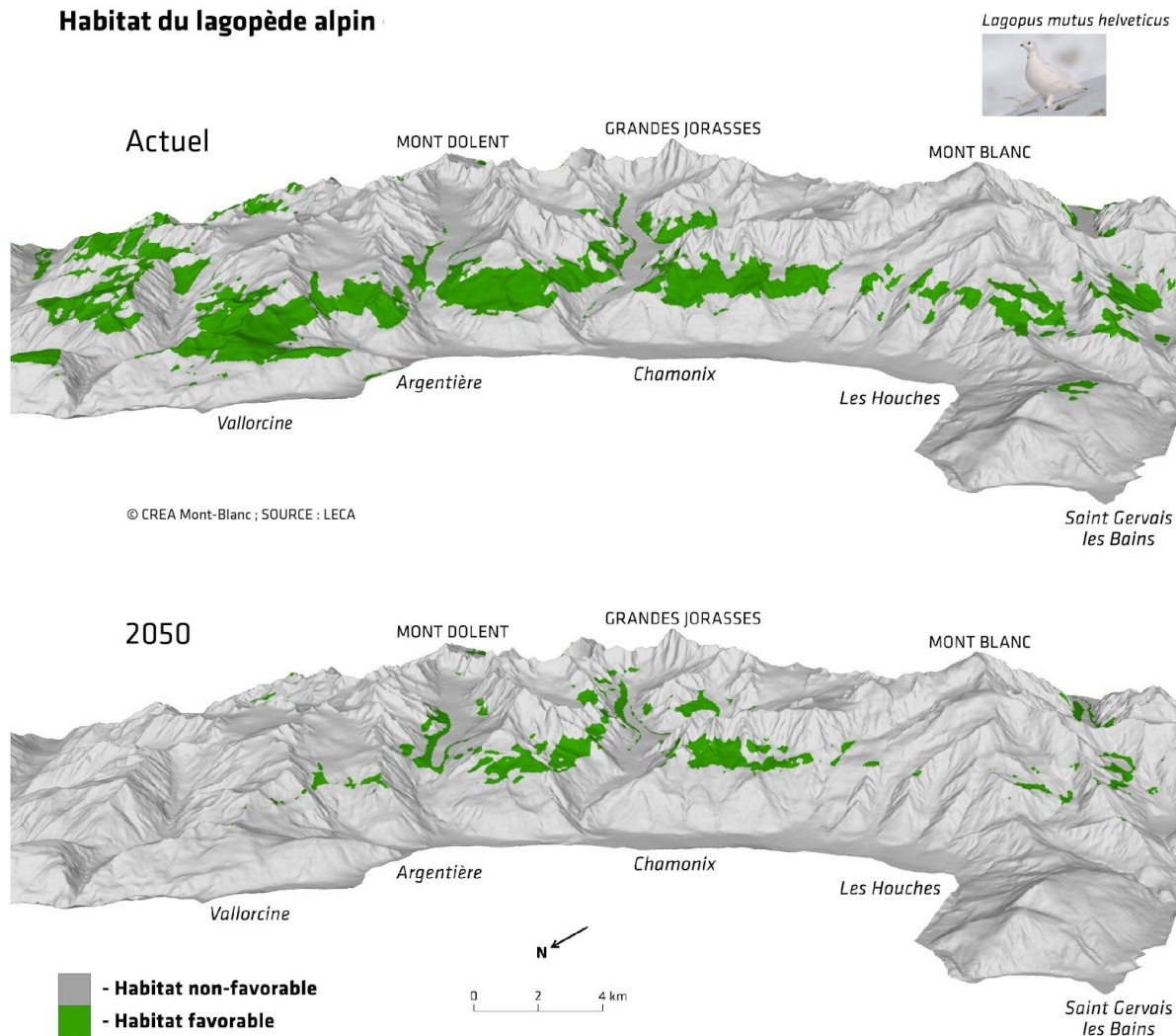


Figure 3.16. Evolution de l'habitat favorable du lagopède alpin (*Lagopus mutus helveticus*) entre la période actuelle et 2050 dans le scénario RCP 8.5. L'augmentation des températures mènent à une remontée en altitude de l'espèce et une forte diminution de l'aire de son habitat favorable, notamment à cause de la forme conique des montagnes et la raideur des pentes dans le massif au-dessus de 2500 m.

Impacts sur les stratégies de conservation

L'évolution continue de ces milieux naturels et des espèces qu'ils abritent génère un besoin d'adaptation des stratégies de conservation des espèces et des espaces. Plusieurs éléments sont à prendre en compte dans les stratégies de conservation :

- des écosystèmes diversifiés et en bon état de conservation sont une des clés de l'adaptation de nombreux autres secteurs (forêt, agriculture, tourisme, risques naturels). Au delà de la conservation d'un patrimoine emblématique, ils sont souvent le **socle de "solutions fondées sur la nature"** face au changement climatique
- la biodiversité subit actuellement une érosion sans précédent, du fait non seulement du changement climatique mais également d'autres pressions anthropiques. Les stratégies de conservation devront nécessairement **prendre en compte simultanément non seulement des pressions liées au changement climatique mais aussi celles liées à d'autres perturbations** comme la fréquentation (potentiellement en hausse dans l'EMB - cf. 3.5) ou la fragmentation des

- habitats. En effet, les effets des différentes pressions peuvent se cumuler et les réponses à chaque pression se compléter ou parfois se contredire
- la complexité du fonctionnement des écosystèmes et la présence d'effets en chaîne, parfois à double tranchant, dont beaucoup ne sont pas encore pleinement appréhendés scientifiquement et pour lesquels on dispose de peu de données, exige une **gestion adaptative, très réactive et adossée à un système de suivi rapproché**
 - les espaces protégés ou naturellement peu anthropisés sont des **espaces naturels d'adaptation** pour des espèces qui font face à un changement d'une rapidité inédite. Ils constituent pour beaucoup leur seule chance d'adaptation. La perte d'habitat des espèces spécialistes (Figure 3.15) pourra mener à une réduction de la taille et de la résilience (en termes de diversité génétique et fonctionnelle) de ces populations, les rendant d'autant plus fragiles face à la rapidité du changement climatique. Un enjeu majeur est donc la **conservation de milieux naturels diversifiés** afin de garantir une diversité de solutions et d'espaces d'adaptation pour les espèces alpines.

Dans cette perspective, quelques lignes directrices peuvent émerger pour l'adaptation des stratégies de conservation :

- La haute montagne restera une zone refuge pour plantes et animaux aux spécificités alpines. Le territoire du Mont-Blanc par sa géographie aura donc une responsabilité de plus en plus importante pour la conservation de ces espèces et écosystèmes patrimoniaux en Europe. Aujourd'hui, ces zones de haute montagne sont relativement peu anthropisées ce qui en font des refuges naturels pour la faune et la flore. Avec le changement climatique, la pression sur ces zones actuellement peu fréquentées ou utilisées par l'Homme pourrait s'accroître. **Les enjeux de gestion et de protection de la biodiversité s'élargiront donc, vers des altitudes plus élevées, ou des milieux aujourd'hui sans fort besoin de gestion** comme les zones de retrait glaciaire ou les zones humides d'altitude.
- **Les mesures de gestion et même la délimitation des zones à protéger devront être adaptatives en fonction de l'évolution des espèces et habitats.** Les corridors écologiques ou les zones tampons autour des espaces protégés devront accompagner l'évolution de la distribution des populations animales et végétales pour permettre leur migration en altitude ou vers des microreliefs propices à leur développement. Selon les choix de gestion décidés, ces espaces de transition devront rechercher un équilibre subtil entre protection de zones refuges pour les espèces alpines spécifiques et limitation dans ces zones de l'arrivée d'espèces thermophiles ou invasives.
- L'impact à court et long termes sur la biodiversité et sur les services écosystémiques doit être pleinement **pris en compte dans les décisions d'aménagement et dans la gestion de la fréquentation.** Cette fréquentation tendra à s'accroître et à s'étendre sur des saisons aujourd'hui peu touristiques, entraînant probablement une demande en infrastructures (sentiers, bâti...) et un dérangement accru. L'augmentation de la fréquentation à la fin du printemps et au début de l'été sera à surveiller tout particulièrement car les animaux, affaiblis par l'hiver et en pleine reproduction, sont particulièrement sensibles au dérangement. Les plantes sont elles sensibles au piétinement.
- **Favoriser la diversité des milieux naturels en préférant des solutions fondées sur la nature**, par exemple une activité pastorale extensive et adaptée dans l'espace et dans le temps aux conditions changeantes d'enneigement et de climat estival (sécheresses et canicules notamment) pour gérer les espaces ouverts, ou encore une grande diversité végétale dans les pôles de fraîcheur implantés en ville.

3.5 Tourisme

Le secteur touristique représente un des secteurs économiques les plus importants de l'EMB (soit 6-8% du PIB régional en Vallée d'Aoste dans la période 2013-2017, considérant seulement les secteurs du logement/hôtelier et de la restauration, source : Observatoire économique et social de la Région Autonome Vallée d'Aoste, 2018 - ou encore 30% de l'emploi privé sur le versant français de l'EMB en 2105, source : Savoie Mont-Blanc Tourisme Zoom Territoire, 2017). Le tourisme hivernal est tourné vers la pratique du ski, activité qui est directement influencée par les conditions climatiques soit en termes de durée du manteau neigeux naturel soit en termes de pratiques d'aménagement et de gestion des stations de ski (production de neige artificielle). Le tourisme estival pourrait d'un côté bénéficier des conditions de température favorables comparées à celles des plaines en devenant des pôles de fraîcheur, notamment en moyenne montagne. Dans un contexte de haute montagne en revanche, le réchauffement conduira à une dégradation des conditions nécessaires pour la pratique estivale de l'alpinisme.

Tourisme d'hiver

En étant directement dépendant des températures et de l'enneigement, le ski représente une industrie particulièrement vulnérable au changement climatique. Dans le massif du Mont-Blanc, **la période enneigée (avec de la neige au sol) a diminué de 40 jours entre 1500 m et 2500 m depuis les années 1970** (Klein et al., 2016). **D'ici 2050, une réduction d'encore 40 % à 90 % de l'enneigement est attendue.** A 1500 m, la durée de la période enneigée sera raccourcie à nouveau de 40 jours (Verfaillie et al., 2018), avec une réduction plus importante au printemps qu'en automne (Klein et al., 2016). La réduction sera moins forte (de 20 % à 40 %) entre 1500 m et 2500 m d'altitude et encore moins au dessus de 2500 m (entre 5 et 10% ; Frei et al., 2018; Marty et al., 2017). La Figure 3.17 montre une représentation de la réduction de l'enneigement pour deux versants dans la vallée de Chamonix et la Figure 3.18 montre une projection à 2050 de la durée de l'enneigement naturel à l'échelle de l'EMB, selon le scénario intermédiaire (RCP 4.5). On s'attend à la disparition du manteau neigeux dans les fonds de vallée et une baisse de l'ordre de 20 jours d'enneigement en moyenne montagne à l'horizon 2050 (Figure 3.18).

Réduction de l'enneigement à l'horizon 2050 - RCP 4.5

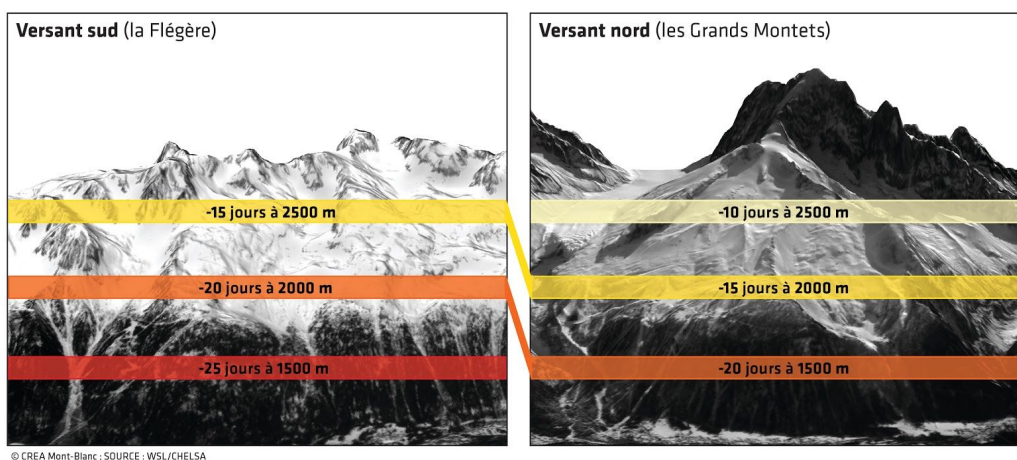


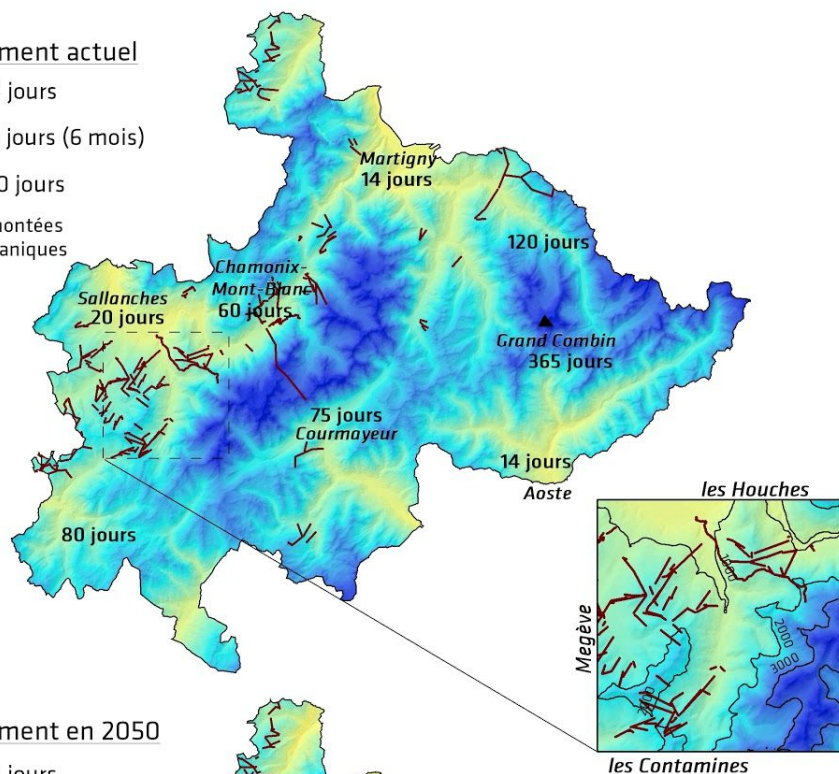
Figure 3.17. Réduction de la durée d'enneigement (nb. de jours avec de la neige au sol) en versants sud et nord à l'horizon 2050, montrée ici dans la vallée de Chamonix. On constate que la réduction sera la plus marquée en versant sud et en dessous de 2000m. Le fond d'image est issu d'une image du satellite Sentinel-2 prise en février 2016.

DUREE DE L'ENNEIGEMENT (actuel et 2050 - RCP 4.5)

Enneigement actuel



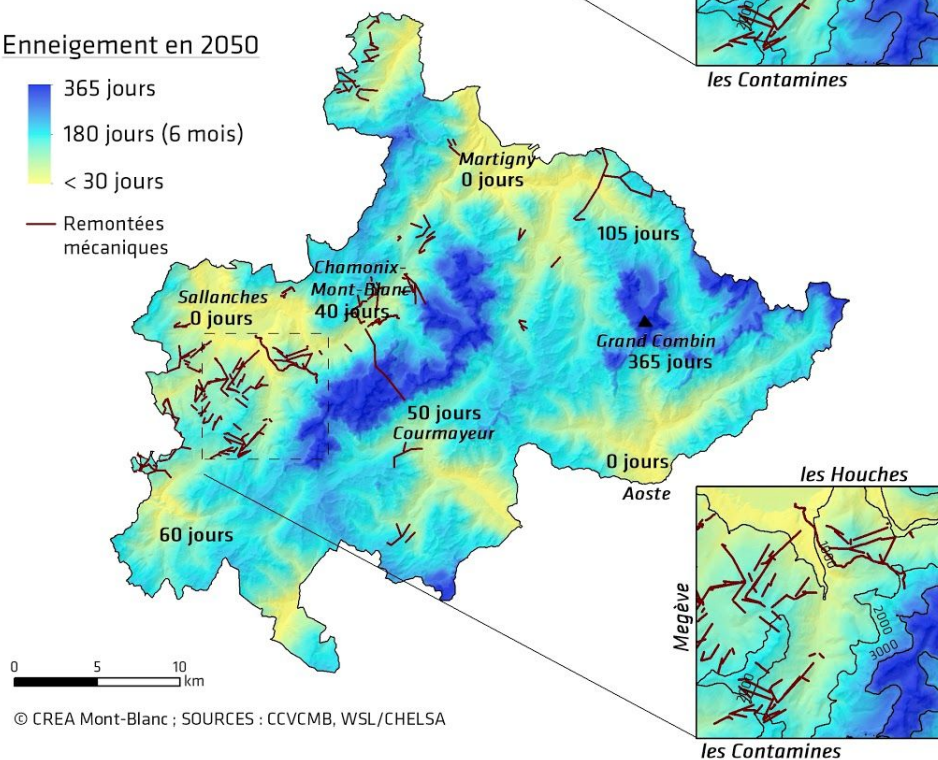
Remontées mécaniques



Enneigement en 2050



Remontées mécaniques



© CREA Mont-Blanc ; SOURCES : CCVCMB, WSL/CHLSA

Figure 3.18. Evolution de la durée d'enneigement (nb. de jours avec de la neige au sol) dans l'EMB à l'horizon 2050. On s'attend à la disparition du manteau neigeux dans les fonds de vallée et une baisse générale dans la durée d'enneigement jusqu'à 3000 m, y compris dans les stations de skis de l'EMB (note : la localisation des remontées mécaniques en Italie est en Suisse n'est ni exhaustive ni exacte).

La réduction de la neige dépend à la fois des conditions climatiques qui deviennent moins favorables à l'accumulation de la neige (notamment des températures hivernales plus chaudes qui résultent en plus de précipitations arrivant sous forme de pluie) et des conditions printanières plus chaudes qui mènent à une fonte accélérée du manteau neigeux. La Figure 3.19 montre la réduction du nombre de jours avec précipitations sous forme de neige à différentes altitudes. À 1600 m, une réduction de 25 % est prévue

dès 2030 et de 30-35 % pour 2050. Une réduction similaire est attendue à 2000 m, tandis que la réduction à 2400 et à 2700 m est plus faible : à ces altitudes on s'attend à une réduction de 9 et 16 % en 2030.

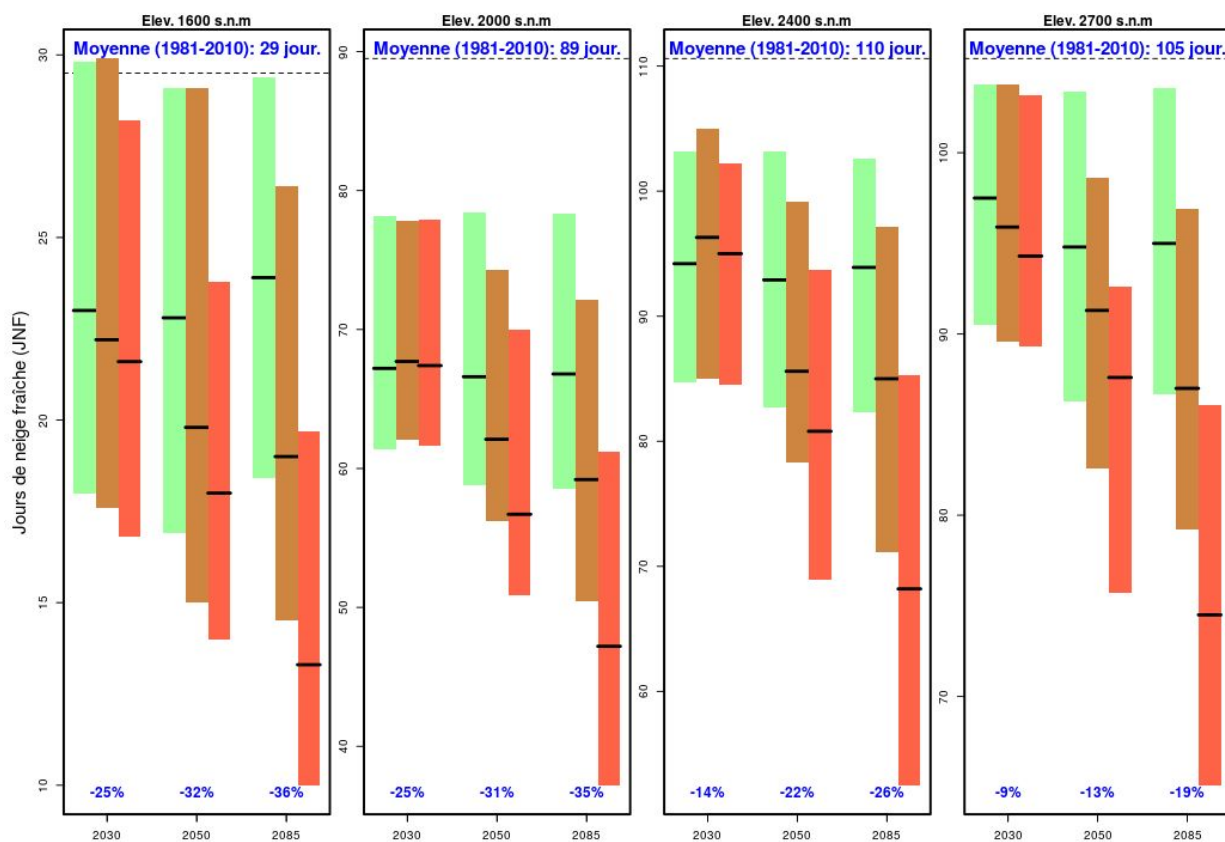


Figure 3.19. Variation du nombre de jours avec des précipitations sous forme de neige, à quatre différentes altitudes. La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés. © ARPA VdA, source CH2018.

Pour garantir une couverture neigeuse suffisante pour la pratique du ski et réduire les pertes économiques, les stations peuvent s'adapter aux aléas climatiques présents et aux changements futurs avec plusieurs méthodes de gestion de la neige (enneigement artificiel, préparation des pistes, damage de la neige, ...). L'efficacité à long terme de ces méthodes de gestion dépend de plusieurs facteurs comme les scénarios de température et humidité, la disponibilité en eau et en énergie et la capacité de payer les coûts d'investissement et d'exploitation (Spandre et al., 2019a, Spandre et al., 2019b). **La disponibilité en eau sera un facteur important à considérer** étant donnée la baisse attendue des débits hydriques en automne (Figure 3.2) qui risque de réduire la possibilité de détourner et stocker l'eau dans un but de production de neige artificielle. Dans les conditions où ces méthodes de gestion de la neige seront mises en place de façon soutenable, du point de vue environnemental et économique, les impacts de la réduction de l'enneigement naturel pourront être atténués.

Pour le futur plus proche (2035, 2050) les risques les plus grands de perte de viabilité sont attendus pour les stations de ski ou le bas des stations, à une altitude inférieure à 2000 m, tandis que pour les stations au dessus de 2000 m les risques attendus dépendent de la configuration topographique et des paramètres ci-dessus nécessaires à la mise en oeuvre des méthodes de gestion de la neige. La Figure 3.20 montre la réduction du nombre de journées pendant lesquelles les conditions thermiques

nécessaires à la production de neige artificielle sont atteintes. La production de neige de culture ne peut se faire techniquement qu'à partir d'une température humide (température de l'air une fois saturé en eau) de -2°C , c'est-à-dire d'une température sèche (normale) comprise entre -3°C et -7°C selon le taux d'humidité de l'air. La production optimale est cependant obtenue avec des températures humides entre -5 et -8°C . (Spandre et al., 2019a). La figure se concentre sur le mois de novembre qui est crucial pour la gestion des stations afin de favoriser l'ouverture début décembre.

En 2035, à 1600 et 2000 m, on prévoit que **les journées potentielles d'enneigement artificiel pour le mois de novembre (JPEA)** passeront de 8 à entre 5 et 7 jours. Cette réduction sera accentuée en 2050 (de 3 à 6 JPEA à 1600 m et de 4 à 7 à 2000 m) pour se situer en fin du siècle de 2 à 6 JPEA. Pour le futur proche (2035-2050) le scénario le plus pessimiste prévoit 6 JPEA à 2400 m (2050) et 9 JPEA à 2700 m. A la fin du siècle la réduction sera très marquée même en altitude, selon le scénario pessimiste (RCP8.5): 3 JPEA à 2400 m et 4 JPEA à 2700 m. Tandis que dans le scénario qui prévoit des fortes actions de mitigation (RCP2.6) la réduction de JPEA en altitude sera minimale. La baisse de viabilité des stations de basse altitude dans les Alpes, pourra à moyen terme profiter aux stations de l'EMB, qui sont localisées à des altitudes plutôt élevées (e.g. environ 2000 m altitude minimale moyenne des pistes des station de la Vallée d'Aoste, Rapport Régional des Remontées Mécaniques 2018) et qui vont potentiellement récupérer des parts de marché (CH2014-Impacts, 2014). **En conclusion, du point de vue des températures, les stratégies d'adaptation des stations de ski par l'enneigement artificiel vont être moins efficaces dans le futur proche (2035-2050) en dessous de 2000 m et les risques grandiront considérablement à plus long-terme (fin du siècle) aussi au dessus de 2000 m.**

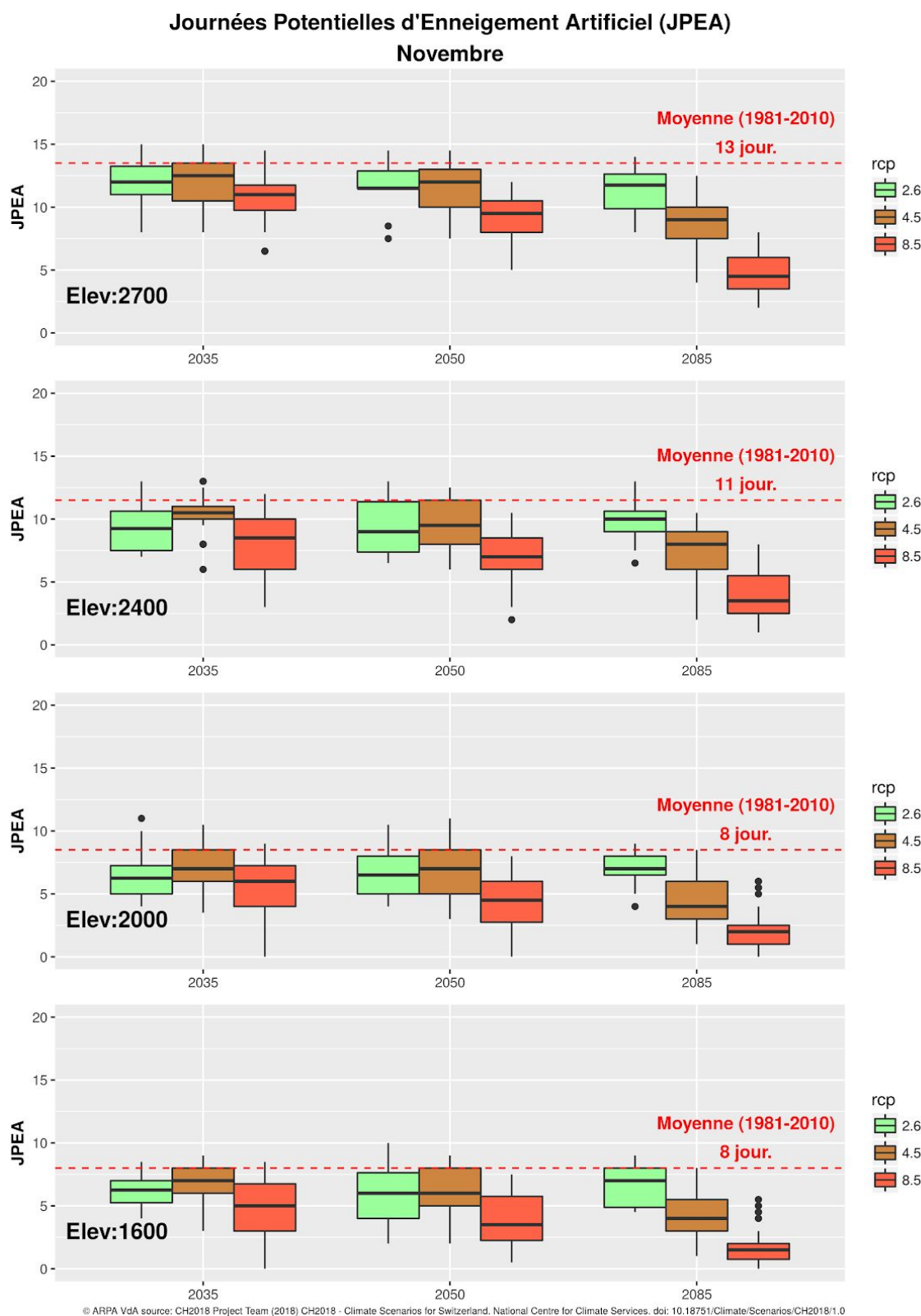


Figure 3.20. Variation du nombre de journées potentielles d'enneigement artificiel (JPEA) au mois de novembre à différentes altitudes. La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés. La ligne rouge horizontale représente le niveau de référence actuel. Le nombre de journées potentielles pour l'enneigement artificiels a été défini en utilisant une température humide minimale journalière de -8°C .

Tourisme estival et hors-saison

Avec l'augmentation des températures, une affluence de touristes fuyant les canicules des plaines et des villes vers des zones plus fraîches est envisageable (Bourdeau, 2009). La Figure 3.21 représente le concept du rôle de pôle de fraîcheur joué par l'altitude : la montagne offre la possibilité de retrouver les conditions climatiques actuelles en montant en altitude. Cependant, cette fréquentation accrue entraînera des enjeux de planification du territoire et d'adaptation de l'offre touristique, d'autant que les milieux d'altitude connaîtront eux-aussi des défis d'adaptation au changement climatique comme décrit dans ce rapport.

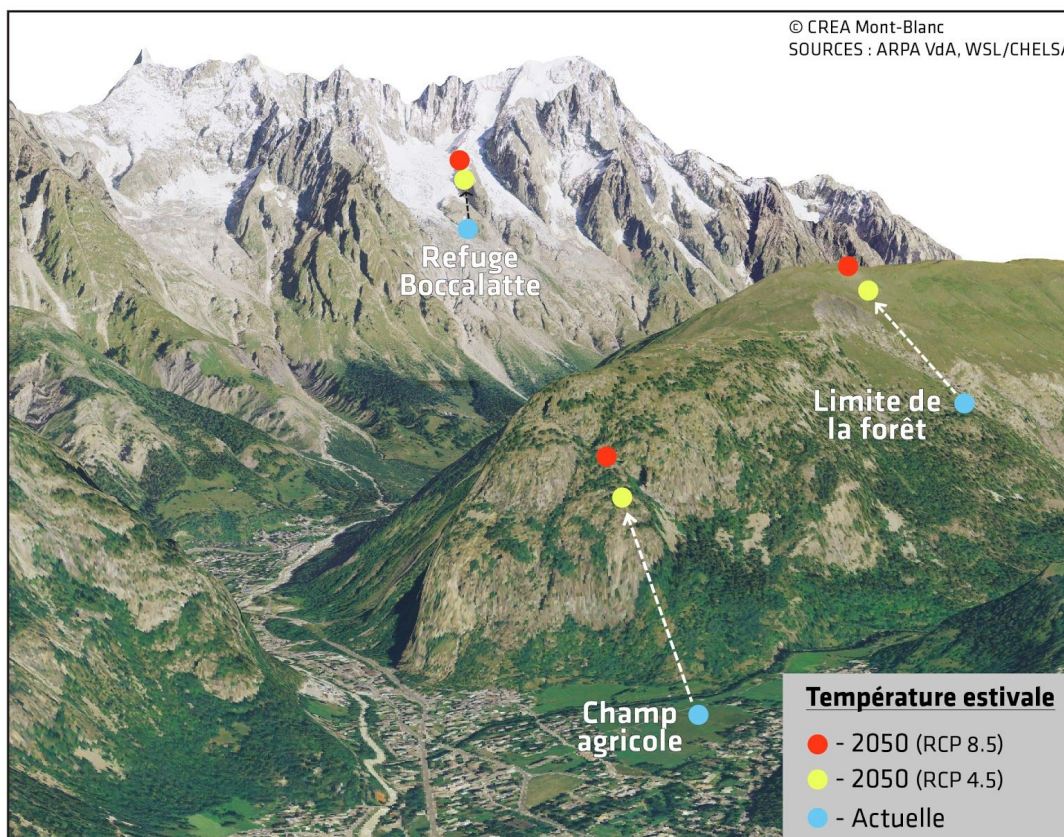


Figure 3.21. Pôles de fraîcheurs estivaux. Le tourisme d'été de l'EMB pourra profiter dans un futur proche d'une affluence de touristes fuyant les canicules des plaines et des villes, même si les conditions de fraîcheur actuelles subiront une transition vers altitudes plus élevées.

L'allongement de la période estivale pourra également bénéficier au tourisme d'été et surtout pendant les périodes actuellement considérées comme étant « hors-saison », au printemps et en automne (CH2014-Impacts, 2014). L'ensemble des paramètres météorologiques (température, vent, radiation solaire, humidité) qui déterminent le confort climatique pour la réalisation des activités touristiques de nature peuvent être synthétisés à l'aide d'un indice de confort comme le **Tourism Climate Index** (TCI, Mieczkowski, 1985). Cet indice définit des catégories de confort (excellent, agréable...). La Figure 3.22 montre ainsi que pour le mois de juin, le réchauffement se traduira par une réduction du confort climatique en fond de vallée tandis qu'à 1000 m les modifications seront limitées. À 1600 et 2000 m les journées considérées agréables ou excellentes vont augmenter.

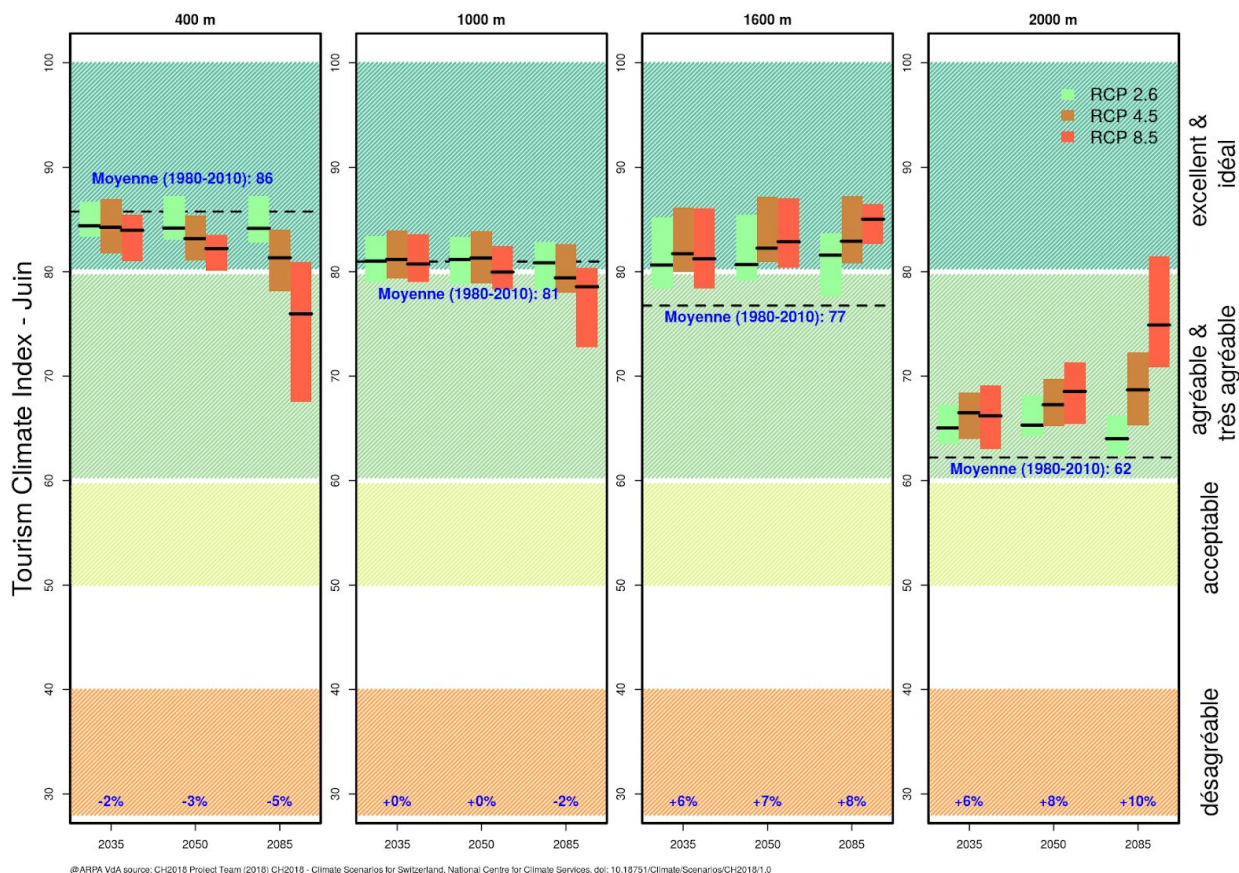


Figure 3.22. Variation du Tourism Climate Index du mois de juin, à quatre altitudes différentes. La couleur des barres représente les différents scénarios climatiques. La hauteur des barres représente l'incertitude (10ème et 90ème percentile), prenant en compte les différents modèles climatiques considérés. Les lignes noires horizontales indiquent la valeur de l'indice dans la période 1980-2010. Les rectangles colorés représentent les différentes catégories de confort climatique.

L'indice TCI du mois de juin peut être synthétisé en analysant la variation du **nombre de journées agréables ou excellentes** par rapport à la période de référence actuelle. La Figure 3.23 montre que dans le futur proche (2035-2050) le nombre de journées excellentes devrait augmenter de 4 à 8 jours entre 1500 et 2000m d'altitude et de 8 à 10 à la fin du siècle. Cette augmentation sera moins forte à 2500 m : +2 à 3 journées agréables en 2035-2050 et +4 à 6 pour la fin de siècle. En revanche à 1000 m les changements seront négligeables. Si on considère le mois d'**octobre** (Figure 3.24), des grandes **opportunités d'allongement de la période "estivale" émergeront** : +2 à 5 journées excellentes à 1000 et 1500 m dans le futur proche (2035-2050) et +6 à 8 journées en fin du siècle; et à 2000 et 2500 m, +2 à 4 journées agréables dans le futur proche (2035-2050) et +4 à 6 journées en fin du siècle.

En conclusion, **une augmentation de presque une semaine des journées de conditions climatiques agréables ou excellentes est prévue à toutes les altitudes pour les mois de juin et octobre dans le futur plus proche (2035-2050)** : le développement touristique en période hors-saison constituera potentiellement une opportunité d'adaptation du secteur touristique, surtout pour les localités en basse altitude qui pourraient être impactées négativement par la réduction de l'enneigement. Il s'en suit que les activités proposées ainsi que les infrastructures devront s'adapter aux nouvelles conditions environnementales pour pouvoir profiter pleinement de ces opportunités.



Figure 3.23. Evolution du nombre de journées excellentes ou agréables à différentes altitudes dans le mois de juin. Les valeurs dans les cercles indiquent l'augmentation du nombre de journées ayant des conditions climatiques agréables ou excellentes pour différentes altitudes (1000, 1500 et 2000, et 2500 m), pour le mois de juin. Les conditions agréables ou excellentes sont définies sur la base du Tourism Climate Index (Mieczkowski, 1985)

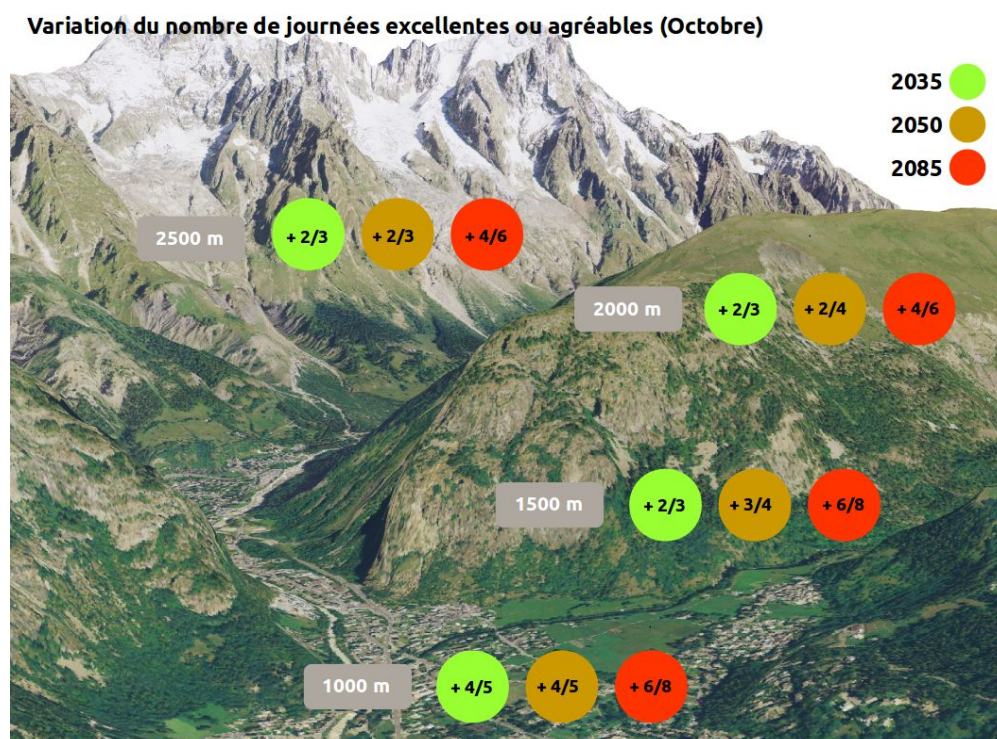


Figure 3.24. Evolution du nombre de journées excellentes ou agréables à différentes altitudes pour le mois d'octobre. Les valeurs dans les cercles indiquent l'augmentation du nombre de journées ayant des conditions climatiques agréables ou excellentes pour différentes altitudes (à 2500 m et de journées en conditions climatiques excellentes à 1000, 1500 et 2000, et 2500 m), pour dans le mois d'octobre. Les conditions agréables ou excellentes sont définies sur la base du Tourism Climate Index (Mieczkowski, 1985).

En même temps il faut considérer que l'attrait touristique de la montagne risque de se modifier avec d'une part l'augmentation de sa dangerosité liée aux risques naturels (cf. 3.6) et d'autre part la **modification des paysages emblématiques de moyenne et haute montagne qui à l'heure actuelle participent à créer « l'imaginaire de la montagne »**.

En haute montagne, il s'agit surtout de la fonte des glaciers et leur aspect « gris » pendant l'été. La colonisation des moraines par la forêt et d'autres plantes pourra avoir des effets positifs, en stabilisant et en rendant plus attirant les paysages post-glaciaires.

En moyenne montagne, sur le long-terme, la remontée de la végétation, en particulier de la forêt, et les modifications de la biodiversité vont aussi impacter les paysages et leur attrait visuel. La remontée de la forêt pourra gêner certaines infrastructures et lieux de passage touristiques qui offrent actuellement une vue dégagée, et non obstruée par la présence d'arbres. La Figure 3.25 montre un exemple de ce processus sur le versant de Chamonix, en indiquant les milieux qui seront très probablement colonisés par la forêt en 2050, c'est à dire notamment le refuge du Plan de l'Aiguille et le sentier du Balcon nord. Coté Courmayeur (Figure 3.26), on peut imaginer que dans un futur proche (2050), la station intermédiaire du Skyway au Pavillon sera entourée par des milieux forestiers. C'est ensuite une question de choix de gestion soit de laisser ces dynamiques suivre leurs trajectoires "naturelles", soit de gérer certains secteurs précis pour limiter la remontée de la forêt.

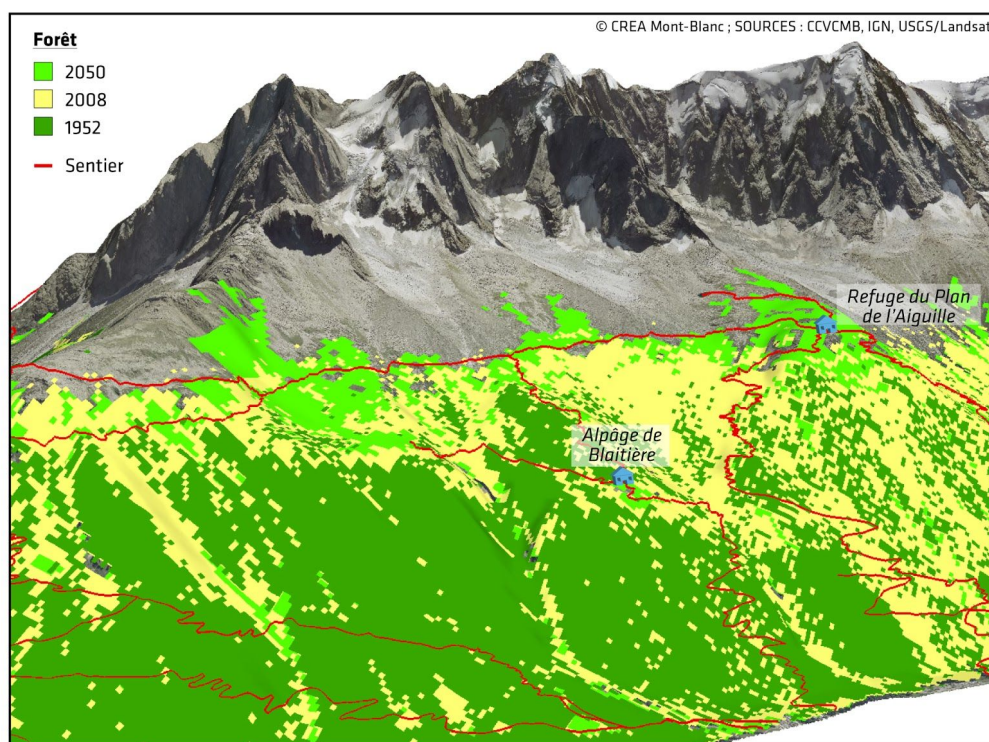


Figure 3.25. Evolution de la couverture forestière entre 1952 et 2050 sur le versant français du massif au Plan de l'Aiguille. Les zones jaunes indiquent la forte remontée et densification de la forêt observées entre les années 1950 et 2000 en lien avec le réchauffement et la déprise agricole. Les zones en vert clair indiquent les milieux qui seront très probablement colonisés par la forêt en 2050, ce qui inclut le refuge du Plan de l'Aiguille et le sentier du Balcon nord.

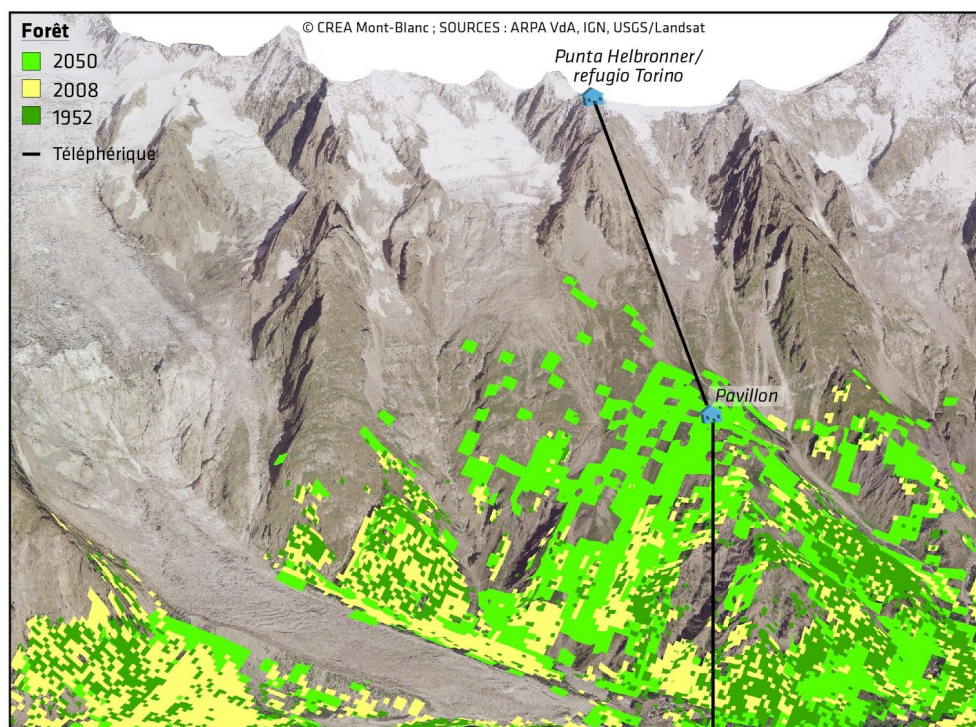


Figure 3.26. Evolution de la couverture forestière entre 1952 et 2050 sur le versant italien du massif au dessus de Courmayeur. Les zones jaunes indiquent la densification de la forêt observée entre les années 1950 et 2000 en lien avec le réchauffement et des changements d'utilisation des terres. Les zones en vert clair indiquent les milieux qui seront très probablement colonisés par la forêt en 2050, ce qui inclut la gare intermédiaire du Skway au Pavillon.

BOX 7: Cas d'étude du Glacier de Tortin



Le glacier de Tortin, entre 2900 m et 3300 m d'altitude, au pied du Mont-Fort, est exploité par Téléverbier et NVrm (Télénendaz) depuis 1980. C'est le point culminant du domaine skiable des 4Vallées. Le secteur est équipé et aisément accessible par des remontées mécaniques depuis les stations de Verbier et de Haute-Nendaz. Le glacier de Tortin diminue continuellement en surface et en

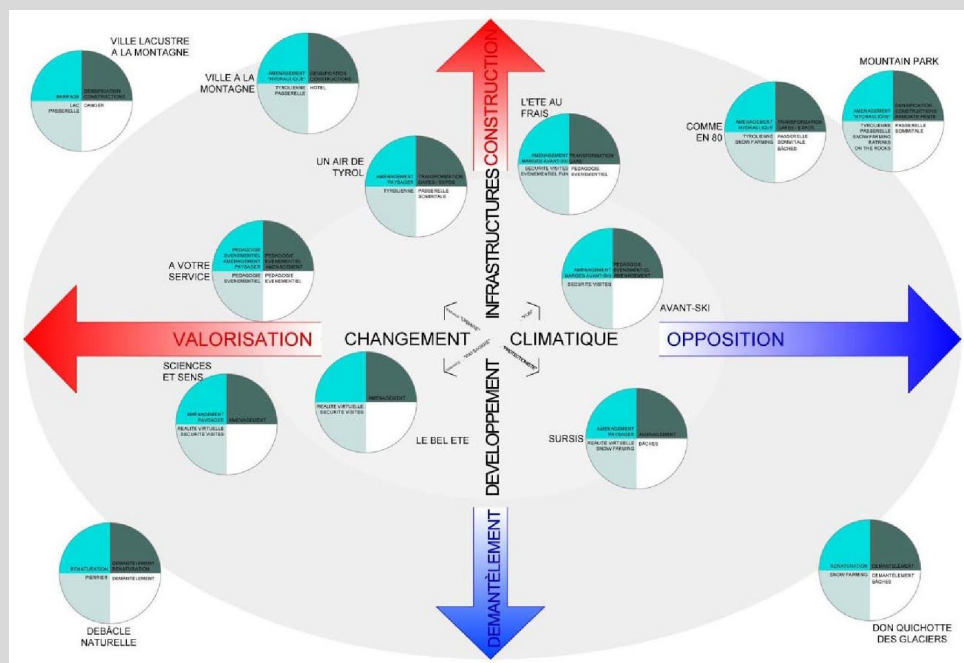
épaisseur. Il ne dispose plus de zones d'accumulation suffisantes. En raison de l'altitude élevée et de l'accessibilité, le ski hivernal n'est pas fondamentalement remis en question. Les exploitants s'accommodent des mouvements du glacier (crevasses) et des changements de terrain (pierriers/moraines remplaçant la glace). Sauf incidence topographique majeure, comme l'apparition de barres rocheuses ou la déstabilisation massive du permafrost, l'activité hivernale peut raisonnablement perdurer, voire être renforcée grâce à une position concurrentielle favorable.

L'**activité estivale** est remise en question. Le ski d'été n'est plus possible en l'état actuel. L'attractivité du secteur se borne par beau temps au panorama et à la randonnée (limitée). Les secteurs à plus basse altitude sont plus attractifs (variés) et coûtent moins cher à exploiter. Cependant le secteur est accessible et peut être mieux exploité. Les remontées mécaniques doivent aujourd'hui faire des choix. Le but du projet pilote est de proposer une méthodologie qui permettra aux acteurs locaux (exploitants) d'élaborer des stratégies et de prendre des décisions en toute connaissance de cause. Les projets qui découleront de ces choix seront soumis aux autorités locales (communes, canton) notamment pour l'obtention de permis de construire. Cette méthodologie se décline par étapes:

1^{ère} étape

En premier les possibilités sont listées en vrac, toutes, même les plus utopiques qui ne seront jamais réalisées mais qui encadrent la réflexion. Ces possibilités sont représentées graphiquement selon deux axes : **démantèlement/construction** et **opposition/valorisation** par rapport au changement climatique.

Axe vertical : **démantèlement/construction**. Cette dimension classe les possibilités en fonction de l'attitude de l'exploitant. Elle part de la déprise puis passe par des actions légères, mesurées, jusqu'aux interventions lourdes. Axe horizontal : **opposition/valorisation**. Cette dimension situe les possibilités face au changement climatique. Elle va de l'opposition visant à essayer de maintenir une pratique jusqu'à l'utilisation du changement climatique pour développer de nouvelles opportunités.



Ce premier outil ne fait pas encore de choix ni de critiques. Il s'agit d'un aperçu qui permet de situer les projets et les attitudes.

2^{ème} étape

En plus de pesées d'intérêts « classiques » basées sur l'attitude face à la montagne, l'intérêt économique, l'impact environnemental, l'opportunité sociale, etc. la question de la résilience face au retrait du glacier **se doit d'être posée**. Il s'agit en particulier d'éviter une attitude aveugle qui éluderait la question (autruche). Il s'agit également de poser un regard critique face à une tentation de mimétisme qui résumerait la stratégie à une copie de la concurrence, même accompagnée d'une montée en puissance de l'offre (plus haut, plus beau, plus impressionnant). Cette analyse multicritère définit **le deuxième outil** de la boîte. Elle s'accompagne de critiques et d'exemples.

CRITERES ENVIRONNEMENTAUX							
IMPACT / CHGT CLIMATIQUE			EXPOSITION AUX DANGERS NATURELS	EVOLUTION IMPACTS DANS LE TEMPS	ADAPTABILITE PROJET		
RETROACTIONS CLIMATIQUES	PRODUCTION D'ENERGIE	RESERVE D'EAU-GLACE	AVALANCHES INONDATIONS EBOULEMENTS	IMPACT REVERSIBILITE	EVOLUTION STABILITE TERRAIN DANS LE TEMPS	SOUPLESSE CHANGE. CLIMAT	DEPENDANT DE LA METEO
=	=	=		-		+	-

3^{ème} étape

Dans un troisième temps, **un choix est fait** et proposé à l'autorité. C'est un choix conscient et justifié qui s'inscrit dans une réflexion large et complète. Pour le projet pilote, c'est aux exploitants que ce choix incombe. Il ne se limite pas à la présentation d'une possibilité. Il explique pourquoi ce sont ces mesures qui ont été retenues par rapport aux autres possibilités. Il annonce clairement une attitude et l'assume vis-à-vis des actionnaires, des autorités, de la population. Ce choix sera fait en toute conscience de sa pérennité et du risque pris.

Bureau d'étude : BFN architectes

Suivi : Fondation pour le développement durable des régions de montagne (FDDM)

Etat du Valais : Service de la mobilité (SDM)

Etat du Valais : Service de l'économie du tourisme et de l'innovation (SETI)

Auteur de la synthèse : Gilles Délèze SDM

L'alpinisme à l'épreuve du climat

Le réchauffement des températures entraîne de profondes modifications en haute montagne dont le retrait des glaciers, la dégradation du permafrost et la baisse de la couverture nivale. Ces phénomènes entraînent à leur tour une hausse dans la fréquence et le volume des écroulements rocheux (plus de 550 écroulements d'un volume supérieur à 100 m³ entre 2007 et 2015 dans le massif du Mont-Blanc, Mourey et Ravanel, 2017), et une baisse des surfaces englacées. **Toutes ces modifications impactent directement les sentiers d'accès aux refuges de haute montagne. Dans le massif du Mont-Blanc, 81 % des gardiens de refuges affirment que la sécurité de leur itinéraire d'accès a changé durant les 10 dernières années** (Mourey et Ravanel, 2017). Dans 96% des cas, l'itinéraire a dû être réaménagé, avec

des coûts pouvant être importants : 130 000€ pour la construction d'une passerelle sur l'itinéraire du refuge des Conscrits (Mourey et Ravanel, 2017). L'accès aux cinq refuges à partir de la Mer de Glace (Chamonix) est menacé : à partir de 1960, de profonds changements sont visibles : déstabilisation des moraines et apparition de dalles rocheuses à cause de la fonte de la glace. Les itinéraires ont dû être modifiés plusieurs fois et des échelles sont alors mises en place chaque année pour combler la baisse d'épaisseur du glacier. Cependant, les moraines restent instables et sont soumises à des glissements de terrains, avec parfois des dégâts humains. C'est le cas du chemin d'accès au refuge de Requin, où un glissement de la moraine latérale gauche du glacier du Tacul a causé plusieurs blessés en 2002. (Mourey et Ravanel, 2017). Les huit itinéraires conduisant aux refuges autour de la Mer de Glace étudiés par Mourey et Ravanel (2017) ont été impactés par la fonte des glaciers et l'érosion des moraines latérales, **posant la question des accès futurs aux refuges et de leur fréquentation.**

Les milieux de haute montagne, support de **la pratique de l'alpinisme, sont soumis à de profondes mutations face au changement climatique** (Deline *et al.*, 2012). Il en résulte une modification notable des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation. Cependant, face à une prise de conscience relativement récente de cette problématique, peu de travaux de recherches ont été réalisés. Dans ce contexte, un travail de thèse de Doctorat (J. Mourey) mené dans le cadre du projet *AdaPT Mont-Blanc* a traité de l'évolution des conditions de pratique de l'alpinisme face aux effets du changement climatique, par une approche pluridisciplinaire structurée autour de trois axes d'étude principaux.

Tout d'abord, l'évolution des itinéraires de haute montagne et de leurs conditions de fréquentation a été reconstituée dans le massif du Mont-Blanc, dans une logique aval-amont. Les résultats montrent par exemple que les itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne, situés en moyenne à 3020 m d'altitude, sont principalement affectés par la fonte des glaciers – le cas du bassin de la Mer de Glace en est un exemple emblématique (Mourey et Ravanel, 2017). Bien que des travaux d'adaptation soient réalisés afin de maintenir l'accessibilité de ces refuges, les itinéraires ont tendance à devenir plus dangereux et plus difficiles techniquement, ce qui remet en question leur fréquentation. Le constat est similaire pour les voies d'alpinisme proprement dite, pourtant situées plus haut en altitude. La comparaison de 95 itinéraires décrits dans l'emblématique topoguide de G. Rebuffat publié en 1973 « *Le massif du Mont-Blanc, Les 100 plus belles courses* », avec leur état actuel a montré que 26 itinéraires ont été fortement modifiés et sont rarement fréquentables en été et que 3 ont complètement disparues (Mourey *et al.*, 2019 ; Figure 3.27). De plus, face à une augmentation de leur technicité et de leur dangerosité, en lien avec une augmentation du nombre de processus géomorphologiques qui les affectent, les périodes de bonnes conditions pour la pratique de l'alpinisme ont tendance à être plus aléatoires en été et se décalant au printemps voire parfois à l'automne.

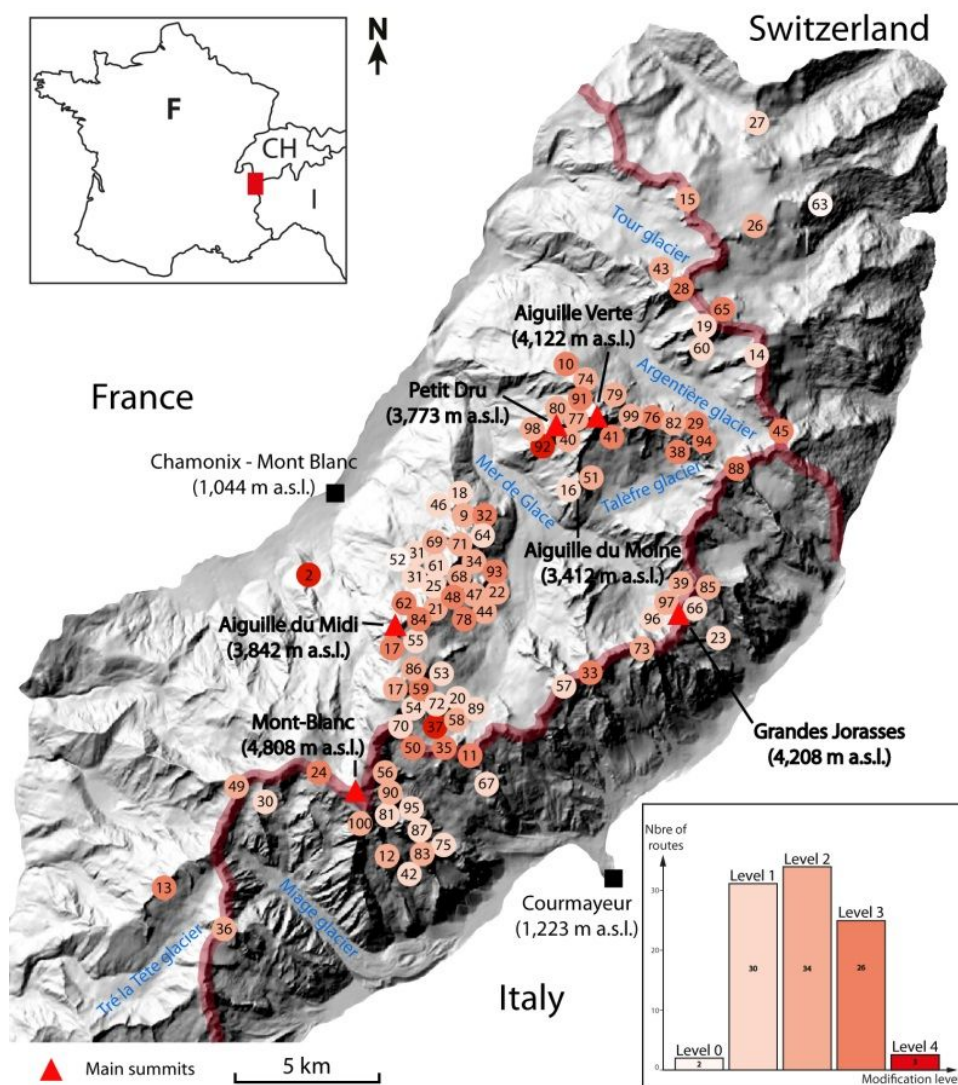


Figure 3.27. Location des itinéraires étudiés et de leur niveau d'évolution (Mourey et al., 2019). Le niveau 0 correspond à aucune évolution tandis que le niveau 4 correspond à une disparition des itinéraires. Les chiffres correspondent au numéro de la course dans le livre, *Le massif du Mont-Blanc : les 100 plus belles courses*, écrit par Gaston Rébuffat (Denoël, 1973).

Ce premier constat a conduit à questionner la manière dont les guides de haute montagne, professionnels emblématiques de l'alpinisme, sont affectés par ces évolutions, et comment ils s'y adaptent, avec une comparaison France/Italie (Salim et al., 2019). Une trentaine d'entretiens semi-directifs avec des guides de haute montagne, des responsables syndicaux, des directeurs de compagnies/bureaux de guides et un questionnaire diffusé aux guides ont montré que, dans l'ensemble, les guides ont la possibilité de faire évoluer la manière qu'ils ont de pratiquer leur métier – notamment grâce à l'ensemble de leurs prérogatives – afin de s'adapter aux changements des conditions de pratique de l'alpinisme et de maintenir leur activité économique. En revanche, le constat est très hétérogène d'un guide à l'autre en fonction de la clientèle et de la motivation personnelle à diversifier les activités pratiquées.

Un itinéraire du massif du Mont-Blanc fait l'objet d'une attention particulière : la voie normale d'ascension du Mont-Blanc (4809 m), particulièrement affectée par le changement climatique. Afin de mieux comprendre l'accidentologie particulièrement importante dans le secteur du Goûter (Mourey *et al.*, 2018), notamment en lien avec des chutes de pierres très fréquentes, un système de suivi pluridisciplinaire a été mis en place (Figure 3.28). Il permettra de mieux comprendre l'origine des chutes de pierres et de mieux évaluer la vulnérabilité des alpinistes à travers des mesures de la fréquentation (compteurs). Les premiers résultats ont permis l'identification de comportements non adaptés au risque local. Des stratégies d'adaptation et de prévention peuvent alors être proposées.

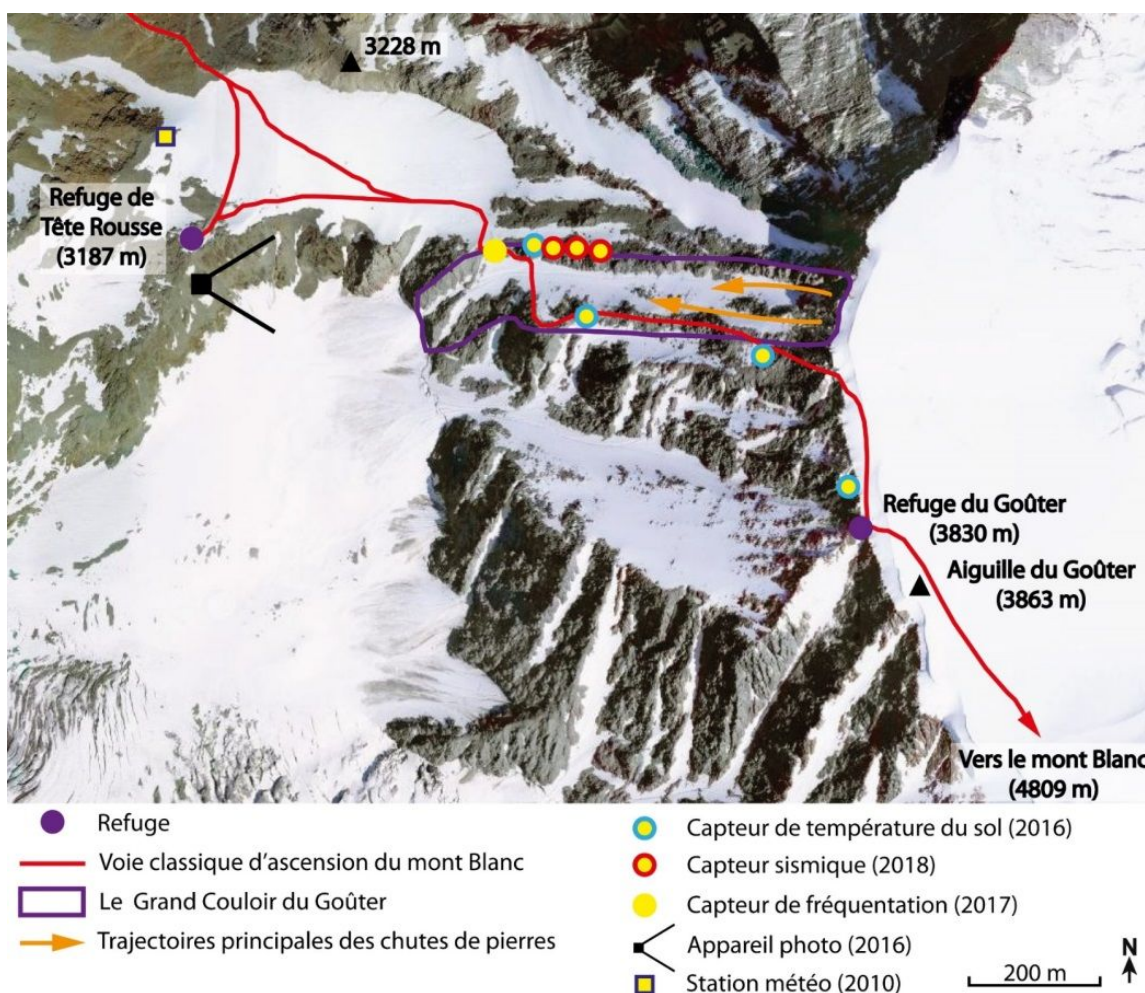


Figure 3.28. Système de suivi pluridisciplinaire mis en place sur la voie normale d'ascension du Mont-Blanc.

Quel avenir pour le tourisme glaciaire dans les Alpes ?

Si le massif du Mont-Blanc a été l'un des premiers territoires concernés par le tourisme glaciaire avec une mise en tourisme des « Glacières » dès 1741, il reste aujourd'hui un territoire d'exception pour qui souhaite observer ou fouler la glace. Est ici considéré comme site touristique glaciaire tout lieu touristique ayant comme principal élément attracteur un glacier, les formes géomorphologiques qui lui sont liées ou les témoignages qu'il a laissés dans le paysage. Selon cette définition, sur les 51 « sites d'importance » recensés dans l'arc alpin par E. Salim dans le cadre de sa thèse de Doctorat (2018-2021) dont une partie est intégrée au projet *AdaPT Mont-Blanc*, le massif du Mont-Blanc en compte 10 répartis entre France, Suisse et Italie. Si quatre de ces sites sont des refuges de montagne, des hôtels ou de petits

sites proches de glaciers, les six autres constituent des sites touristiques majeurs à l'image, en France, de l'Aiguille du Midi (3842 m) et du Montanvers – Mer de Glace (1913 m) qui constituent les deux principales attractions touristiques de la région Auvergne Rhône-Alpes en termes de nombre de visiteurs (données Savoie-Mont-Blanc-Tourisme). En Italie, c'est l'accès à la pointe Helbronner (3462 m) par le téléphérique « Skyway » qui constitue une importante ressource touristique.

Face au retrait glaciaire généralisé et aujourd'hui bien documenté, l'avenir questionne. Si les sites de haute altitude (Aiguille du Midi ou Pointe Helbronner notamment) semblent pour l'instant relativement épargnés par l'évolution actuelle de la cryosphère, la situation pour les sites d'altitudes plus modestes est bien plus préoccupante. Au Montanvers par exemple (Figure 3.29), qui accueille chaque année près de 400 000 visiteurs (donnée CMB), l'épaisseur de glace a diminué de plus de 200 m en un peu plus de 150 ans. La gestion du site nécessite dès lors la mise en place annuelle de nouvelles marches d'escalier (534 en 2019) pour atteindre le glacier et la pérennité de la grotte de glace, creusée chaque année depuis 1946, n'est plus assurée. À ces questions s'ajoute la problématique de la dégradation du paysage causée à la fois par le retrait du glacier et par le développement d'une couverture détritique (couche de débris rocheux) à sa surface. Dans ce cadre, les gestionnaires d'infrastructures ont besoin de mieux connaître les choix et perceptions de leur clientèle afin de mettre en œuvre des modalités d'adaptation.



Figure 3.29. Comparaison de photographies de l'ancienne gare aval du téléphérique conduisant à la Mer de Glace (Ravanel et Moreau, 2018). En haut: vues vers l'amont. En 1985, le mouvement rapide du glacier est suggéré par l'abondance des crevasses. Le glacier est aujourd'hui plat, très lent et doté d'une couverture détritique continue. En bas: vues vers l'aval. En 1986, le glacier touche le contrepoids de l'ancien téléphérique. La surface du glacier est aujourd'hui située 120 m plus bas en altitude.

Ces questions ne concernent pas uniquement le massif du Mont-Blanc. D'autres sites à travers les Alpes subissent des évolutions assez similaires comme au glacier du Rhône en Suisse, du Stubai en Autriche ou encore de Theodule qui donne lieu à une activité économique importante côté suisse comme italien. Dans ce contexte, les recherches qui vont être menées autour du Mont-Blanc dans les prochains mois porteront principalement sur :

- l'évolution des motivations des visiteurs actuels sur les sites glaciaires;
- leur perception de l'évolution du paysage et la manière dont celle-ci peut affecter leur jugement esthétique;
- l'évolution des sites du point de vue des gestionnaires, les problématiques rencontrées ainsi que les besoins en termes d'adaptation.

Au cours de l'été 2019, une première phase de terrain a été réalisée au niveau de six sites touristiques glaciaires emblématiques des Alpes. Trois sites ont été choisis dans le massif du Mont-Blanc et trois autres dans d'autres massifs suisses et français afin de développer une approche comparative. Cette phase de terrain a permis de collecter près de 1 000 réponses à une enquête quantitative interrogeant les motivations des visiteurs et près de 50 entretiens semi-directifs destinés à approfondir cette question ont été menés tout en interrogeant la perception du paysage. Les données recueillies sont en cours d'analyse.

3.6 Risques naturels

L'EMB, comme l'ensemble des Alpes, est un territoire particulièrement sensible aux aléas naturels liés notamment à l'intensification du cycle de l'eau (Huntington, 2006) et aux modifications de la cryosphère (neige, glacier, permafrost) qui est un facteur de contrôle important de la stabilité des parois et des versants (GIEC, 2019). Par rapport à d'autres territoires de montagne, la vulnérabilité de l'EMB est accentuée par i) sa forte densité de population, ii) son importante fréquentation touristique (Huggel et al., 2019), et également par iii) son altitude élevée et iv) sa large surface affectée par les glaciers et le permafrost. Les conditions climatiques qui pourront avoir un impact sur les risques naturels au niveau de l'EMB ont été présentées dans les sections précédentes et sont principalement liées à l'interaction entre l'augmentation de la température, la variation des régimes de précipitations et l'intensification des événements extrêmes (cf. 1.3), et les processus géomorphologiques qui prennent place en haute montagne.

Dans les paragraphes suivants, nous présenterons une synthèse des principaux risques naturels présents au niveau de l'EMB, et de leur évolution au cours des dernières décennies et de celle prévue selon les différents scénarios climatiques pour le futur. La principale source d'information utilisée est le dernier rapport du GIEC "*Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*" (GIEC, 2019).

La **dégradation du permafrost**, qui est directement liée à l'augmentation des températures de surface, peut réduire la stabilité des versants (surtout en présence de volumes de glace dans le sol, de glaciers rocheux, de fissures remplies de glace dans les parois, et à proximité des moraines) et impacter la stabilité des infrastructures en haute montagnes (gares de téléphérique, refuges, bâtiments). Ce phénomène a été bien documenté pour les parois rocheuses du Mont-Blanc où les écroulements rocheux ont augmenté tant en fréquence qu'en volume au cours des dernières décennies en raison de la dégradation - réchauffement - du permafrost (Ravanel et al., 2011) et en réponse aux événements caniculaires (Ravanel et al., 2017). L'augmentation de l'instabilité des versants peut aussi être due au recul des glaciers qui entraîne potentiellement la déstabilisation des moraines latérales et des parois rocheuses environnantes. Ce processus de "décompression post-glaciaire" peut parfois être limité à l'occasion de la colonisation par la végétation des surfaces libérées (GIEC, 2019).

Les **avalanches de glace et chutes de séracs** sont des processus liés à l'interaction entre le réchauffement climatique et l'évolution naturelle de certains glaciers. Il est donc difficile de les relier directement au changement climatique et d'en prévoir l'occurrence dans le futur (Faillietaz et al., 2015). Il y a toutefois un fort consensus à propos du fait que l'écroulement des fronts des glaciers suspendus, ou qui se trouvent dans des conditions de forte pente, sera exacerbé par le réchauffement de la température basale de des glaciers (GIEC, 2019).

Les modifications de l'enneigement pourront par ailleurs impacter la probabilité et la typologie de déclenchement des **avalanches de neige**. À haute altitude, la remontée de la limite pluie-neige et le réchauffement des températures vont augmenter la fréquence des avalanches de neige humide, même en plein hiver. Contrairement aux étages de moyenne montagne, les modèles prévoient une augmentation du nombre d'avalanches de type humide ou mixte en haute montagne, comme observé depuis le milieu des années 1970 dans le massif du Mont-Blanc (Naaïm et al., 2016). Pendant les dernières décennies, à l'échelle des Alpes, une augmentation du nombre des avalanches de type humide et une réduction du volume des avalanches individuelles, au moins dans certains secteurs, ont été observées (GIEC, 2019). Il est important de signaler que les avalanches de neige humide peuvent mener à des dégâts importants sur les infrastructures de montagne, comme à Saint François-Longchamp (Savoie) en mars 2012, quand une coulée de neige humide a détruit un télésiège. Les scientifiques s'accordent à dire que les tendances observées vont se poursuivre et s'intensifier à l'avenir. En résumé, nous pouvons nous attendre, pour les avalanches, à **des risques se réduisant à basse altitude et à une modifications des caractéristiques des avalanches à plus haute altitude**.

Les phénomènes de crues des cours d'eau et de laves torrentielles déclenchées par la **vidange brutale de poches d'eau ou de lacs glaciaires** sont généralement liés à l'évolution récente des glaciers. Il s'agit de l'un des risques les plus documentés en haute montagne et qui peuvent impacter de vastes portions de territoire. Le retrait glaciaire est en effet à l'origine de nombreux nouveaux lacs glaciaires et d'une augmentation du volume des lacs existants, aussi bien à l'échelle des Alpes qu'au niveau de l'EMB (Magnin et al., 2019). L'eau de fonte est parfois piégée par les moraines terminales laissées par le glacier, et risquent de se rompre brutalement en cas de trop-plein ou de chutes de glace ou de roche issues des parois environnantes. Au regard de la fonte accélérée des glaciers prévue pour les prochaines décennies, il est probable que ce phénomène s'intensifie et puisse représenter un risque important pour les vallées.

La dégradation du permafrost et la fonte de la neige peuvent aussi interagir avec le risque des crues, de laves torrentielles et de coulées boueuses, notamment lors d'**événements pluvieux sur la couverture neigeuse** qui peuvent accélérer la fusion de la neige, mobiliser d'importantes masses d'eau et causer des dégâts significatifs en zone de montagne (Pomeroy et al., 2016). Les scientifiques ont une confiance notable dans le fait que la fréquence de ces événements a effectivement augmenté ces dernières décennies, notamment en altitude et surtout lors des changements de saison automne-hiver et hiver-printemps. Il est par contre probable que ces événements baissent en fréquence à basse altitude en fonction de la réduction de la durée de l'enneigement. Une étude récente (Beniston et Stoffel, 2016) prévoit que, dans les Alpes suisses, ces événements soient plus fréquents dans le futur pour un scénario de réchauffement intermédiaire (2-4°C) et moins fréquents pour un scénario de réchauffement extrême (RCP8.5). Ces événements pourraient donc interagir de manière différenciée avec le risque de crues, en particulier pendant le début du printemps et la fin de l'automne.

En conclusion, on peut constater avec une confiance élevée que le **risque de crues, de laves torrentielles et d'inondation**, soit à cause des modifications de la cryosphère présentées dans les

paragraphe précédents soit en raison de l'augmentation dans la fréquence des événements de fortes précipitations (Figures 1.21 et 1.22), est susceptible d'augmenter dans l'EMB dans les années à venir.

En se basant sur les scénarios climatiques et un modèle hydrologique prenant en compte la fonte des glaciers et de la neige (Silvestro et al., 2013), la Figure 3.30 présente la modification du nombre de journées pendant lesquelles les seuils d'alerte pour les inondations (alerte, pré-alarme et alarme) seront dépassés pour la Doire jusqu'à l'aval de la commune de Courmayeur. Pour les seuils d'alerte, on prévoit une augmentation de leur déclenchement de 70 à 100 % (*i.e.* de 1.5 à 3.2 jours par an) dans un futur proche (2035-2050) et de plus de 150 % d'ici la fin du siècle. Une augmentation est également prévue pour les seuils de pré-alarme et d'alarme : de 1.3 jours environ par décennie actuellement à 2.2 jours en 2050.

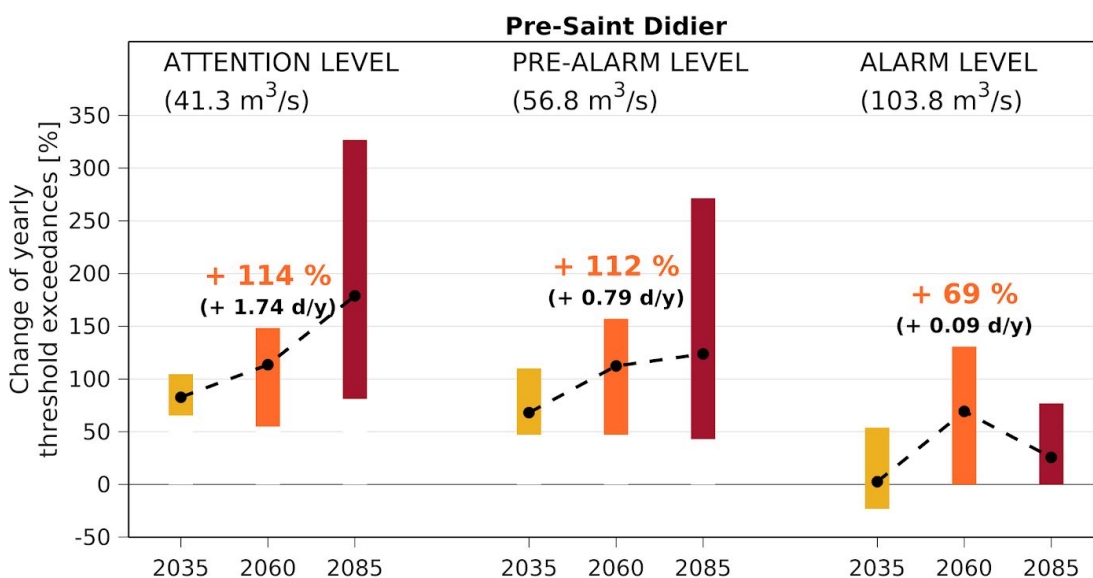


Figure 3.30. Modification du nombre de journées pendant lesquelles les seuils d'alerte sont atteints pour les inondations sur le côté italien de l'EMB (Doire de Vény, Courmayeur, Vallée d'Aoste). Les simulations sont basées sur trois scénarios d'émissions confondus (RCP 2.6, 4.5, 8.5), un modèle climatique (EC-EARTH-RCA4) et un modèle hydrologique qui tient compte de la dynamique glaciaire et nivale (Silvestro et al., 2013). La hauteur des barres colorées représente l'incertitude du modèle. Les chiffres entre parenthèse au-dessous des seuils d'alerte indiquent les débits. *Source : CIMA Foundation, Centro Funzionale Regione Valle d'Aosta.*

Il est très important de garder à l'esprit que les risques naturels présentés dans les paragraphes précédents, dans un contexte de haute montagne comme celui l'EMB, peuvent agir en synergie et de manière cumulative, entraînant des effets en cascade : une avalanche de glace peut par exemple déclencher la vidange d'un lac glaciaire ou amorcer une avalanche de taille plus conséquente. Toutes les stratégies d'adaptation aux risques dans l'EMB doivent donc tenir compte de ces possibilités d'interactions entre aléas. Les scénarios de dégradation du permafrost, de retrait des glaciers et de rupture de lacs glaciaires laissent présager, avec un consensus fort, que la fréquence et la magnitude de ces événements cumulatifs augmenteront dans le futur et que les surfaces concernées par ces nouveaux risques augmentera.

BOX 8: Évolution de la stabilité des infrastructures construites sur le permafrost

L'industrie des sports d'hiver dans les Alpes occidentales a connu un développement important au cours des quatre dernières décennies et plusieurs centaines d'infrastructures (remontées mécaniques, refuges, ouvrages défensifs contre les avalanches, etc.) ont été construites en haute montagne sur le permafrost (terrains gelés en permanence). Depuis une trentaine d'années, une augmentation généralisée de la température du permafrost alpin a été observée.

Dans le contexte de réchauffement climatique et de dégradation (réchauffement) du permafrost, les infrastructures deviennent vulnérables face à d'éventuelles déstabilisations de leurs terrains porteurs.

Dans les Alpes françaises, des travaux de recherche sont actuellement menés dans le cadre du projet EU-POIA PermaRisk (en particulier par P.-A. Duvillard). Il vise à (1) identifier l'ensemble des infrastructures construites en contexte de permafrost, (2) réaliser un inventaire le plus exhaustif possible des dommages subis par ces infrastructures sur la base d'enquêtes réalisées auprès des gestionnaires, et (3) identifier les principaux processus géomorphologiques responsables des désordres géotechniques. Le recensement des éléments d'infrastructures (par exemple un pylône) sous Système d'Information Géographique a d'abord été réalisé en utilisant différentes sources d'informations dont des cartes de distribution du permafrost (par ex. : Magnin *et al.*, 2015) pour les parois et les formations superficielles, à l'échelle de massifs ou à celle des Alpes françaises. Au total, 947 éléments d'infrastructures sont présents sur des terrains à permafrost. 74 % d'entre eux sont des composantes de remontées mécaniques (Duvillard *et al.*, 2015, complété).

Le travail d'enquête réalisé auprès des gestionnaires et exploitants d'infrastructures des stations concernés par le permafrost a permis de dresser un inventaire des dommages. D'après les informations qui ont pu être rassemblées, plus d'une quinzaine d'infrastructures des Alpes françaises a connu des dommages très vraisemblablement liés au permafrost sur les 30 dernières années. Ces infrastructures ont été endommagées (affaissements, basculements, détérioration des fondations ou ancrages) puis généralement réhabilitées (ajustements, consolidations ou reconstructions), mais parfois sans solution géotechnique à long terme. On observe par ailleurs une augmentation relative du nombre des structures endommagées sur les deux dernières décennies (9 cas entre 2000 et 2010 contre le double sur la période 2010-2018 ; Fig. BOX8.1) et une augmentation des coûts de maintenance (Duvillard *et al.*, 2019). Ce travail n'est toutefois pas exhaustif du fait d'un manque d'informations pour certaines stations de haute altitude mais il est certainement révélateur d'une évolution générale dans les Alpes.

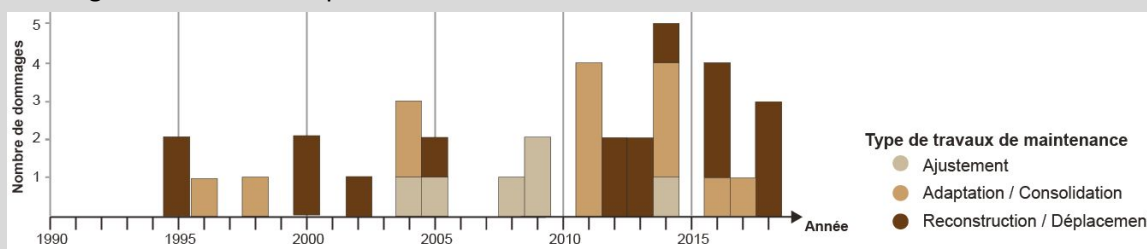


Figure BOX 8.1. Évolution du nombre de dommages et travaux de maintenance sur les infrastructures présentes en contexte de permafrost dans les Alpes française pour lesquelles des informations ont été réunies (Duvillard *et al.*, 2019).

La majorité des dommages a été identifiée au niveau de terrains riches en glace comme des glaciers rocheux. Ils auraient sans doute pu être anticipés et/ou évités avec des diagnostics et études géotechniques plus détaillés et prenant mieux en considération la question du permafrost. Les processus géomorphologiques à l'origine des déstabilisations d'infrastructures sont essentiellement

des processus lents, parfois déclenchés par des perturbations anthropiques. Anticiper les instabilités nécessite de préciser les quantités de glace présentes dans les terrains ainsi que la température de ces derniers. Cela représente un véritable challenge pour garantir la stabilité des infrastructures construites en haute montagne et notamment sur des parois rocheuses. Même s'il existe assez peu d'infrastructures installées dans de telles parois dans les Alpes françaises, elles sont particulièrement sensibles, à l'image du refuge des Cosmiques installé sur une arête rocheuse (3613 m, massif du Mont-Blanc, Fig. BOX8.2). En 1998, un écoulement rocheux de 600 m² survenu sur le versant SE avait entraîné la déstabilisation d'une partie du bâtiment, nécessitant d'importants travaux de confortement (Ravanel et al., 2013). Le secteur fait aujourd'hui l'objet d'un suivi géophysique et thermique afin de préciser l'évolution actuelle du permafrost.

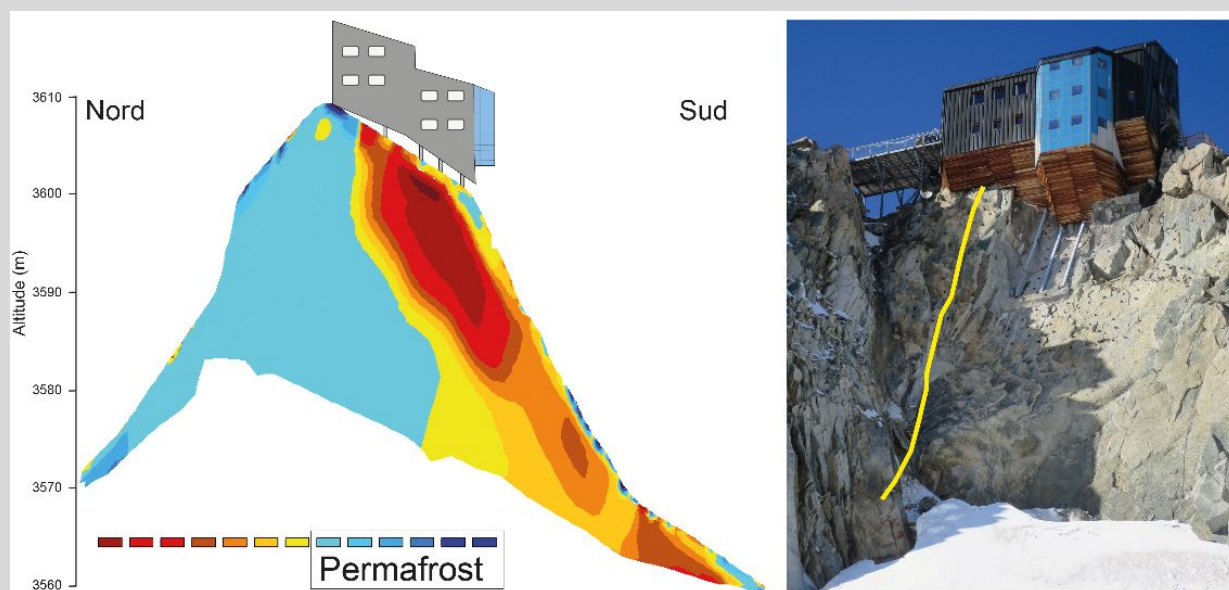


Figure BOX 8.2. Distribution du permafrost dans l'arête inférieure des Cosmiques par tomographie électrique en 2016.

Face à l'évolution très rapide des milieux de haute montagne (Bodin *et al.*, 2015), deux perspectives de recherche sont à envisager pour poursuivre le développement des connaissances nécessaires à une gestion efficace des infrastructures de haute montagne. Il est notamment nécessaire i) de poursuivre l'inventaire des dommages pour approfondir les connaissances en termes géotechniques sur les terrains à permafrost. Ce panel d'expériences permettra ii) de proposer des solutions techniques concrètes ainsi que des recommandations techniques de maintenance ou de construction pour les gestionnaires d'infrastructures.

L'EMB se trouve dès lors dans un contexte général d'augmentation des risques. Les évolutions restent néanmoins très difficiles à prévoir et à modéliser avec précision compte tenu de la nature chaotique des processus qui les entraînent et de la complexité des interactions avec les forçages climatiques. Il est important de souligner le rôle non-négligeable des spécificités locales pour chaque risque et une généralisation reste délicate. Il est donc fondamental d'envisager des **stratégies d'adaptation** qui agissent à différents niveaux et qui puissent permettre aux collectivités locales de s'approprier une gouvernance efficace des enjeux. Parmi les principaux axes à privilégier, il est important de mettre en place les actions nécessaires au développement d'une **culture du risque en montagne**, en favorisant les interactions entre les compétences techniques et scientifiques et les différentes approches de sciences

sociales (actions de sensibilisation à destination de la population, valorisation des connaissances locales, collaboration avec les différents médias, définition de stratégies de communication active et d'information et d'alerte de la population pour favoriser l'acceptation sociale des pratiques d'adaptation, etc.). Dans ce contexte, il devient prioritaire de **mettre en application le concept de «risque soutenable»**, où la protection de la population (actuelle et future) est l'un des objectifs majeurs qui implique nécessairement la prise en compte des possibilités futures de développement et la durabilité des choix adoptés (cf. : projet Alcotra RISKNET). L'objectif spécifique à poursuivre devra ainsi être le développement d'une culture commune transfrontalière dans le domaine de l'évaluation des risques naturels, prenant en compte les aspects économiques, socio-économiques et systémiques. Un rôle fondamental est également joué par la mise en oeuvre et la gestion à long-terme des **réseaux d'observations** et de suivi des processus sur le territoire (intégration de méthodes de suivi, suivi adaptatif, gestion des systèmes d'alerte précoce, ...). En parallèle, le **soutien financier et socio-politique aux activités de recherche** et d'étude sur les interactions entre la cryosphère et les risques sera un facteur clé pour combler les importantes lacunes en termes de connaissance. Cela a d'ailleurs été souligné par le GIEC dans son dernier rapport sur la cryosphère (GIEC, 2019). Un des atouts les plus significatifs de l'EMB, formalisé à travers les nombreuses collaborations existantes, sera le **partage des expériences au niveau transfrontalier** et entre les différents acteurs du territoire (chercheurs, municipalités et administrations locales/régionales, professionnels, etc.). Du point de vue de la gouvernance, il sera également essentiel de favoriser une intégration plus transversale des thèmes liés à l'interaction entre changements climatiques et risques naturels durant les phases de **planification du territoire**. L'élaboration et la mise à jour périodique des cartes d'aléas et de risques doit donc constituer une priorité, au fur-et-à-mesure du développement des connaissances et de la production de résultats de projets scientifiques.

Enfin, compte tenu de la difficulté de mettre en place des mesures d'adaptation et de gestion des territoires dans un contexte transfrontalier, l'EMB pourra promouvoir des moments d'échanges sur les bonnes pratiques et devenir une véritable **plateforme de collaborations entre gestionnaires et juristes pour examiner les responsabilités et la mise en application du concept d'auto-responsabilité** au regard des changements des conditions de la montagne en cours.

4. Conclusion

Les constats faits dans ce rapport plaident pour des politiques d'adaptation elles-mêmes adaptatives et révisées au rythme des changements, déjà rapides et en cours d'accélération. Le rapport fait apparaître de grands défis face à la hausse des températures et à l'augmentation des événements extrêmes, nécessitant de grandes mutations socio-économiques et culturelles. Apparaissent également de nombreuses opportunités stratégiques pour l'EMB, appelé sans doute à devenir une zone refuge tant pour les espèces animales et végétales que pour les humains.

Ce rapport est une première étape dans notre appréhension des mutations en cours et dans la planification de stratégies d'adaptation. Certains manques ont été identifiés lors de la rédaction de ce rapport, qui pourront faire l'objet d'études futures pour :

i) **Approfondir la compréhension de certains impacts sectoriels**, limitée actuellement par manque de données ou de temps disponible pour ce rapport, tels que par exemple :

- agriculture : analyse des impacts des sécheresses estivales sur les systèmes pastoraux de moyenne et haute montagne, intégration d'autres pathogènes dans l'évaluation des modifications des cycles des parasites, et analyse du risque des gelées tardives sur les phases phénologiques plus précoces ;
- eau : analyses spécifiques de la distribution saisonnière du stress hydrique en tenant compte des différents usages au niveau de bassin versant, modélisation de scénarios d'évolution de la température des cours d'eau et analyses des impacts potentiel sur les écosystèmes fluviaux, ... ;
- forêt : amélioration des algorithmes de prédiction des paysages futurs, notamment en utilisant des approches non-linéaires et en intégrant des variables explicatives telles que la pression pastorale et le climat, extension de l'analyse à l'ensemble de l'EMB et non seulement au coeur du massif, modélisation de l'évolution des services écosystémiques forestiers (e.g. puits de stockage de carbone, fonction de protection des dangers naturels, ...) et des impacts potentiels d'événements extrêmes, incendies et parasites;
- patrimoine naturel et conservation : modélisation de la distribution des espèces de montagne sur l'ensemble de l'EMB en fonction des scénarios climatiques les plus récents et du recul glaciaire, en intégrant si possible les activités humaines (fréquentation, pastoralisme...) comme co-variable, étude de l'évolution des zones de retrait glaciaire dans un rôle de refuge, suivi et étude des capacités d'adaptation d'espèces-clés dans les écosystèmes de montagne, études en lien avec les gestionnaires d'espaces naturels pour intégrer les enjeux climatiques dans les stratégies de gestion des milieux ;
- tourisme : étude culturelle et socio-psychologique sur la représentation de la montagne et la capacité d'évolution de cette représentation auprès des visiteurs et des acteurs socio-professionnels, notamment sur les milieux naturels et activités les plus impactées ; évaluation des impacts économiques des modifications envisagées pour le tourisme hivernal et estival ;
- risques naturels : réalisation d'études sur les interactions entre la cryosphère et les risques naturels en moyenne/haute montagne avec un focus spécifique sur les effets cumulatifs ;
- santé et bien être : analyses spécifiques sur le thème.

- ii) **Mieux prendre en compte les interactions entre secteurs**, pour identifier les synergies ou au contraire les impacts cumulatifs à prendre en compte, par exemple entre tourisme estival / hors saison et conservation de milieux naturels spécifiques ou eau et agriculture et tourisme hivernal et estival.
- iii) **Intégrer les effets cumulatifs liés non seulement au changement climatique mais aussi aux autres impacts humains à l'oeuvre sur l'environnement** (artificialisation des sols, fréquentation, pollution, démographie future...) qui, suivant les choix stratégiques faits sur ces autres paramètres pourront accompagner ou au contraire fragiliser les politiques d'adaptation au changement climatique.
- iv) **Analyser l'état actuel et les scénarios d'évolution des principaux services écosystémiques** à l'échelle de l'EMB avec une approche pluri-disciplinaire, focalisé sur l'ensemble du gradient altitudinal, avec un focus spécifiques sur les « zones charnières » entre 2000-2500 m.
- v) Mieux **inclure dans les analyses les aspects socio-culturels pour favoriser la prise en charge** par la population, les différents porteurs d'intérêt et les décideurs **de l'importance des actions et des politiques d'adaptation aux changements climatiques** dans l'EMB et mieux transmettre les résultats d'études scientifiques.

Le paysage de la Mer de Glace en **2015**



Le paysage de la Mer de Glace imaginé en **2050**



Figure 3.31. Aquarelles par l'artiste Claire Giordano du paysage de la Mer de Glace en 2015 et en 2050, d'après les cartes de recul glaciaire et de colonisation végétale à l'horizon 2050. Source des données : IGE, Landsat/USGS © 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 des scénarios CH2018 (CH2018) 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.

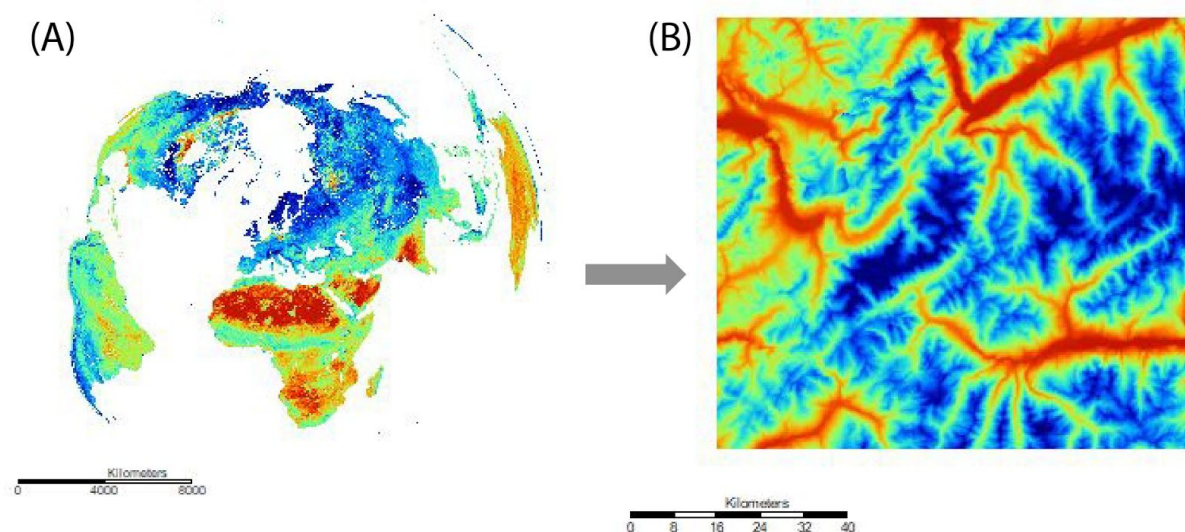


Figure A1. (A) Exemple des données brutes de CHELSA (températures), disponibles à l'échelle mondiale à une résolution de 4 x 4 km. (B) La démarche méthodologique a consisté à adapter les données brutes au relief de l'EMB, en tenant compte de l'altitude et l'ensoleillement. La résolution des cartes des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

La période actuelle de référence pour CHELSA court de 1979 à 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 logiciel [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 : CH2018

Les scénarios CH2018 (CH2018) sont basés sur les projections climatiques EURO-CORDEX, qui combinent de simulations de modèles climatiques globaux (GCM) et régionaux (RCM). En particulier, on a utilisé 68 simulations EURO-CORDEX, dont 12 pour les scénarios d'émission RCP2.6, 25 pour RCP4.5 et 31 pour les RCP8.5. Ces trois scénarios sont basés sur des taux d'émission de gaz serre très différents: d'un côté une forte mitigation des émissions, une transition vers la décarbonation qui respecterait aussi l'accord de Paris (augmentation de température à la fin du siècle < 2°C, RCP2.6) et de l'autre une encore forte émission (assimilable à ce qui historiquement était défini "business-as-usual" scenario, augmentation de température à la fin du siècle de 4-5°C, RCP8.5), avec un scénario intermédiaire (RCP4.5, +2.5°C en 2100). Les trois scénarios sont nommés sur la base du forcing radiatif qu'on aura à la fin du siècle, si l'on suit ce scénario particulier.

Le produit utilisé (DAILY-LOCAL) est constitué des séries temporelles de données journalières entre 1981 et 2099. Cinq variables sont utilisées: température minimale, maximale, et moyenne, précipitation (cumulée journalière) et humidité relative. Les séries temporelles continues sur toute la période ("transient scenarios") permettent d'adresser de façon quantitative les indices liés aux événements extrêmes, ce qui n'était pas possible avec les scénarios CH2011 utilisés avant ("delta change approach").

Les données sont disponibles pour 86 stations du réseau MeteoSuisse, parmi lesquelles onze ont été choisies pour le calcul des indices climatiques. Le tableau A1 montre les caractéristiques des stations météo sélectionnées. Le choix des stations est basé sur le critère des analogues climatiques (Dahinden et al., 2017). On a donc calculé un indice de dissimilarité combiné pour température et précipitation entre chaque station Meteo Suisse et les stations de référence de l'Espace Mont-Blanc, et identifié les plus proches climatiquement aux stations de l'espace Mont-Blanc (table A1). Pour la plupart des analyses, les stations ont été organisées en trois tranches d'altitude: fond de la vallée (400-1000m), moyenne montagne (1000-2000m) et haute montagne (2400-2700m).

ID	Nom complet	Altitude	latN	lonE	Bande d'altitude
PUY	Pully	455	46.51	6.68	Fonds de Vallée
SIO	Sion	482	46.22	7.33	Fonds de vallée
VIS	Visp	639	46.3	7.85	Fonds de vallée
LAG	Langnau	745	46.94	7.81	Fonds de Vallée
GST	Gstaad	1045	46.47	7.29	Moyenne montagne
GRC	Grächen	1605	46.20	7.84	Moyenne montagne
ZER	Zermatt	1638	46.03	7.75	Moyenne montagne
MLS	Le Moléson	1974	46.55	7.02	Moyenne montagne
GRH	Grimsel Hospiz	1980	46.57	8.33	Moyenne montagne
GSB	Col du Grand St-Bernard	2472	45.87	7.17	Haute montagne
WFJ	Weissfluhjoch	2691	46.83	9.81	Haute montagne

Table A1 : caractéristiques des stations météo suisses qui ont été utilisées pour calculer les indices de changement climatique.

Annexe 2 : Bibliographie

- Aeschimann, D., Rasolofo, N., & Theurillat, J. P. (2011). Analyse de la flore des Alpes. 1: historique et biodiversité. *Candollea*, 66(1), 27-56.
- Anthelme, F., Villaret, J. C., & Brun, J. J. (2007). Shrub encroachment in the Alps gives rise to the convergence of sub-alpine communities on a regional scale. *Journal of Vegetation Science*, 18(3), 355-362.
- Barros, C., Guéguen, M., Douzet, R., Carboni, M., Boulangeat, I., Zimmermann, N. E., & Thuiller, W. (2017). Extreme climate events counteract the effects of climate and land-use changes in Alpine tree lines. *Journal of applied ecology*, 54(1), 39-50.
- Beniston, M., & Stoffel, M. (2016). Rain-on-snow events, floods and climate change in the Alps: Events may increase with warming up to 4 C and decrease thereafter. *Science of the Total Environment*, 571, 228-236.
- Bodin, X., Schoeneich, P., Deline, P., Ravanel, L., Magnin, F., Krysiecki, J. M., & Echelard, T. (2015). Mountain permafrost and associated geomorphological processes: recent changes in the French Alps. *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, (103-2).
- Boehner, J., Antonic, O. (2009): Land-surface parameters specific to topo-climatology. *Developments in Soil Science*, 33, 195-226.
- Bourdeau, P. (2009). De l'après-ski à l'après-tourisme, une figure de transition pour les Alpes?. Réflexions à partir du cas français. *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, (97-3).
- 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).
- Carlson, B. Z., Georges, D., Rabatel, A., Randin, C. F., Renaud, J., Delestrade, A., Choler, P. & Thuiller, W. (2014). Accounting for tree line shift, glacier retreat and primary succession in mountain plant distribution models. *Diversity and Distributions*, 20(12), 1379-1391.
- 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
- Chaix C., Dodier H., Nettiér B. Comprendre le changement climatique. Alpagnes sentinelles. Rapport. S.I., 2017. Disponible sur : <http://www.alpages38.org/-Alpages-sentinelles-.html>
- Chape, S., Spalding, M., & Jenkins, M. (2008). *The world's protected areas: status, values and prospects in the 21st century*. University of California Press.
- Choler, P. (2015). Growth response of temperate mountain grasslands to inter-annual variations in snow cover duration. *Biogeosciences*, 12(12), 3885-3897.
- Corona-Lozada, M. C., S. Morin, and P. Choler. Drought offsets the positive effect of summer heat waves on the canopy greenness of mountain grasslands. (2019). *Agricultural and Forest Meteorology* 276

- Courbaud, B., Kunstler, G., Morin, X., & Cordonnier, T. (2010). Quel futur pour les services écosystémiques de la forêt alpine dans un contexte de changement climatique?. *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, (98-4).
- Cremonese, E., Filippa, G., Galvagno, M., Siniscalco, C., Oddi, L., di Cella, U. M., & Migliavacca, M. (2017). Heat wave hinders green wave: The impact of climate extreme on the phenology of a mountain grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 320-330.
- Dahinden, F., Fischer, E.M., Knutti R. (2017) Future local climate unlike currently observed anywhere. *Environmental Research Letters*, 12, 084004.
- 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.
- De Boeck, H. J., Bassin, S., Verlinden, M., Zeiter, M., & Hiltbrunner, E. (2016). Simulated heat waves affected alpine grassland only in combination with drought. *New Phytologist*, 209(2), 531-541.
- Deline, P., Gardent, M., Magnin, F., & Ravel, L. (2012). The morphodynamics of the Mont-Blanc massif in a changing cryosphere: a comprehensive review. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94(2), 265-283.
- Dullinger, S., Gattlinger, A., Thuiller, W., Moser, D., Zimmermann, N. E., Guisan, A., & Caccianiga, M. (2012). Extinction debt of high-mountain plants under twenty-first-century climate change. *Nature Climate Change*, 2(8), 619.
- Duvillard, P. A., Ravel, L., & Deline, P. (2015). Risk assessment of infrastructure destabilisation due to global warming in the high French Alps. *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, (103-2).
- Duvillard, P. A., Ravel, L., Marcer, M., & Schoeneich, P. (2019). Recent evolution of damage to infrastructure on permafrost in the French Alps. *Regional Environmental Change*, 19(5), 1281-1293.
- Elkin, C., Gutiérrez, A. G., Leuzinger, S., Manusch, C., Temperli, C., Rasche, L., & Bugmann, H. (2013). A 2° C warmer world is not safe for ecosystem services in the European Alps. *Global Change Biology*, 19(6), 1827-1840.
- Faillietaz, J., Funk, M., & Vincent, C. (2015). Avalanching glacier instabilities: Review on processes and early warning perspectives. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 203-224.
- Filippa, G., Cremonese, E., Migliavacca, M., Galvagno, M., Forkel, M., Wingate, L., & Richardson, A. D. (2016). Phenopix: An R package for image-based vegetation phenology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 220, 141-150.
- Filippa, G., Cremonese, E., Galvagno, M., Isabellon, M., Bayle, A., Choler, P., Carlson, B.Z., Gabellani, S., Morra di Cella, U. & Migliavacca, M. (2019). Climatic Drivers of Greening Trends in the Alps. *Remote Sensing*, 11(21), 2527.
- Galvagno, M., Wohlfahrt, G., Cremonese, E., Rossini, M., Colombo, R., Filippa, G., & Migliavacca, M. (2013). Phenology and carbon dioxide source/sink strength of a subalpine grassland in response to an exceptionally short snow season. *Environmental Research Letters*, 8(2), 025008.
- 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.
- Garel, M., Gaillard, J. M., Jullien, J. M., Dubray, D., Maillard, D., & Loison, A. (2011). Population abundance and early spring conditions determine variation in body mass of juvenile chamois. *Journal of Mammalogy*, 92(5), 1112-1117.
- 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.

Gottfried, M., Pauli, H., Futschik, A., Akhalkatsi, M., Barančok, P., Alonso, J. L. B. & Krajči, J. (2012). Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature climate change*, 2(2), 111.

Huggel, C., Muccione, V., Carey, M., James, R., Jurt, C., & Mechler, R. (2019). Loss and Damage in the mountain cryosphere. *Regional Environmental Change*, 19(5), 1387-1399.

Hufkens, K., Basler, D., Milliman, T., Melaas, E.K. & Richardson, A.D. (2018). An integrated phenology modelling framework in R. *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*.

Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 83-95.

IPBES, Résumé à l'intention des décideurs du rapport d'évaluation de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques concernant les pollinisateurs, la pollinisation et la production alimentaire. S. G. Potts, V. L. Imperatriz-Fonseca, H. T. Ngo, J. C. Biesmeijer, T. D. Breeze, L. V. Dicks, L. A. Garibaldi, R. Hill, J. Settele, A. J. Vanbergen, M. A. Aizen, S. A. Cunningham, C. Eardley, B. M. Freitas, N. Gallai, P. G. Kevan, A. Kovács-Hostyánszki, P. K. Kwapong, J. Li, X. Li, D. J. Martins, G. Nates-Parra, J. S. Pettis, R. Rader et B. F. Viana, éd. Secrétariat de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques, Bonn (Allemagne). 36 pages. Disponible à l'adresse <http://doi.org/10.5281/zenodo.2616458>.

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.

IPCC 2018, SR1.5: *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.

IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]. In press.

Jakoby, O., Lischke, H., & Wermelinger, B. (2019). Climate change alters elevational phenology patterns of the European spruce bark beetle (*Ips typographus*). *Global change biology*.

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.

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.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., ... & Arneeth, A. (2018). Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data (Online)*, 10(4).
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J. & Lexer, M. J. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest ecology and management*, 259(4), 698-709.
- 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.
- Martin, F. (2014). Etude de l'impact des changements climatiques et d'utilisation du sol sur l'évolution de la forêt et de sa limite supérieure dans le massif du Mont-Blanc entre 1952 et 2006. Mémoire. S.I. : Université Joseph-Fourier.
- Mieczkowski, Z. (1985). The tourism climatic index: a method of evaluating world climates for tourism. *Canadian Geographer/Le Géographe Canadien*, 29(3), 220-233.
- Moriondo, M., Jones, G.V., Boi, S. B., Dibari, C., Ferrise, R., Trombi, G., & Bindi M. (2013). Projected shifts of wine regions in response to climate change. *Climatic Change* 119, no. 3-4: 825-839.
- Mourey, J., & Ravanel, L. (2017). Evolution of Access Routes to High Mountain Refuges of the Mer de Glace Basin (Mont-Blanc Massif, France). An Example of Adapting to Climate Change Effects in the Alpine High Mountains. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, (105-4).
- Mourey, J., & Ravanel, L. (2017). Évolution des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace (massif du Mont-Blanc, France). *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, (105-4).
- Mourey J., Moret O., Descamps P., Bozon S. (2018). *Accidentologie sur la voie classique d'ascension du Mont-Blanc de 1990 à 2017*. Fondation PETZL – Projet AdaPT Mont-Blanc, 22 p.
- Mourey, J., Marcuzzi, M., Ravanel, L., & Pallandre, F. (2019). 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*, 51(1), 176-189.
- Naaïm, M., Eckert, N., Giraud, G., Faug, T., Chambon, G., Naaïm-Bouvet, F., & Richard, D. (2016). Impact of climate warming on avalanche activity in French Alps and increase of proportion of wet snow avalanches. *HOUILLE BLANCHE-REVUE INTERNATIONALE DE L'EAU*, (6), 12-20.
- Neukom, R., Steiger, N., Gómez-Navarro, J. J., Wang, J., & Werner, J. P. (2019). No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. *Nature*, 571(7766), 550-554.
- Pauli, H., Gottfried, M., Reiter, K., Klettner, C., & Grabherr, G. (2007). Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA* master site Schrankogel, Tyrol, Austria. *Global change biology*, 13(1), 147-156.
- Paulsen, J., & Körner, C. (2014). A climate-based model to predict potential treeline position around the globe. *Alpine Botany*, 124(1), 1-12.
- 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.

- Pomeroy, J. W., Fang, X., & Marks, D. G. (2016). The cold rain-on-snow event of June 2013 in the Canadian Rockies—characteristics and diagnosis. *Hydrological Processes*, 30(17), 2899-2914.
- Quénol, H., Garcia de Cortazar Atauri, I., Bois, B., Sturman, A., Bonnardot, V., & Le Roux, R. (2017). Which climatic modeling to assess climate change impacts on vineyards?. *OENO One*, 51(2), 91-97.
- Ravanel, L., & Deline, P. (2011). Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont-Blanc massif) since the end of the 'Little Ice Age'. *The Holocene*, 21(2), 357-365.
- Ravanel, L., Deline, P., Lambiel, C., & Vincent, C. (2013). Instability of a high alpine rock ridge: The lower Arête des Cosmiques, Mont-Blanc Massif, France. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 95(1), 51-66.
- Ravanel, L., Magnin, F., & Deline, P. (2017). Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont-Blanc massif. *Science of the Total Environment*, 609, 132-143.
- Ravanel L., Moreau L. (2018). Apparitions et disparitions glacio-géomorphologiques autour de la Mer de Glace au cours des étés 2016 et 2017. *Nature et Patrimoine en Pays de Savoie*, 55 : 25-25.
- Rebetez, M., & Dobberty, M. (2004). Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. *Theoretical and applied climatology*, 79(1-2), 1-9.
- Rebaudo, F., Struelens, Q., & Dangles, O. (2017). Modelling temperature-dependent development rate and phenology in arthropods: The de-vRate package for R. *Methods Ecol Evol*.
- Revermann, R., Schmid, H., Zbinden, N., Spaar, R., & Schröder, B. (2012). Habitat at the mountain tops: how long can Rock Ptarmigan (*Lagopus muta helvetica*) survive rapid climate change in the Swiss Alps? A multi-scale approach. *Journal of Ornithology*, 153(3), 891-905.
- Rughetti, M., & Festa-Bianchet, M. (2012). Effects of spring-summer temperature on body mass of chamois. *Journal of mammalogy*, 93(5), 1301-1307.
- Salim, E., Mourey, J., Ravanel, L., Picco, P., & Gauchon, C. (2019). Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique. Quelles perceptions et stratégies d'adaptation au pied du Mont-Blanc?. *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*.
- Saulnier, M., Roques, A., Guibal, F., Rozenberg, P., Saracco, G., Corona, C., & Edouard, J. L. (2017). Spatiotemporal heterogeneity of larch budmoth outbreaks in the French Alps over the last 500 years. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(5), 667-680.
- Scherrer, D., & Körner, C. (2011). Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming. *Journal of Biogeography*, 38(2), 406-416.
- Schumacher, S., & Bugmann, H. (2006). The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps. *Global Change Biology*, 12(8), 1435-1450.
- Sérès, C. Changement climatique et agriculture d'élevage en zone de montagne : premiers éléments de réflexion. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 2010, n° 58, pp. 21-36
- Silvestro, F., Gabellani, S., Delogu, F., Rudari, R., & Boni, G. (2013). Exploiting remote sensing land surface temperature in distributed hydrological modelling: the example of the Continuum model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 39.
- Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N. & Morin, S. (2019a). Climate controls on snow reliability in French Alps ski resorts. *Scientific Reports*, 9(1), 8043.

- Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Pons, M., Vernay, M., Lafaysse, M. & Morin, S. (2019b). Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical adaptation. *Cryosphere*, 13, 1325-1347.
- 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.
- Thuiller, W., Guéguen, M., Bison, M., Duparc, A., Garel, M., Loison, A. & Poggiato, G. (2018). Combining point-process and landscape vegetation models to predict large herbivore distributions in space and time—A case study of *Rupicapra rupicapra*. *Diversity and Distributions*, 24(3), 352-362.
- Toïgo, C., Couilloud, F., Maillard, D. (2016). Réchauffement climatique et performance chez le bouquetin des Alpes. Faune sauvage, n° 312, pp. 5.
- 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.
- Vincent, C., Peyaud, V., Laarman, O., Six, D., Gilbert, A., Gillet-Chaulet, F. & Jourdain, B. (2019). Déclin des deux plus grands glaciers des Alpes françaises au cours du XXI^e siècle: Argentière et Mer de Glace. *La Météorologie*.
- 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.
- Wermelinger, B., & Seifert, M. (1999). Temperature-dependent reproduction of the spruce bark beetle *Ips typographus*, and analysis of the potential population growth. *Ecological Entomology*, 24(1), 103-110.
- Wheeler, J. A., Hoch, G., Cortés, A. J., Sedlacek, J., Wipf, S., & Rixen, C. (2014). Increased spring freezing vulnerability for alpine shrubs under early snowmelt. *Oecologia*, 175(1), 219-229.
- Wipf, S., Stoeckli, V., & Bebi, P. (2009). Winter climate change in alpine tundra: plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing. *Climatic Change*, 94(1-2), 105-121.
- Wipf, S., Stöckli, V., Herz, K., & Rixen, C. (2013). The oldest monitoring site of the Alps revisited: accelerated increase in plant species richness on Piz Linard summit since 1835. *Plant Ecology & Diversity*, 6(3-4), 447-455.
- Zekollari, H., Huss, M., & Farinotti, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Cryosphere*, 13(4), 1125-1146.

Annexe 3 : Définitions et acronymes (définitions signalées par un * dans le texte)

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

CHELSEA : 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/

CH2018 : Données climatiques journalières pour des stations en Suisse mise à jours en fonctions des nouveaux modèles et scénarios climatiques, disponibles jusqu'à 2100 - <https://c2sm.ethz.ch/research/ch2018.html>

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 (IPCC) : 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

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière, fournisseur de cartes et de photos aériennes pour la France

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

Landsat : Série de satellites mises en route par la NASA pour observer les surfaces terrestres du globe, et commencé dans les années 1970s

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

Phénologie : Les événements biologiques saisonniers (débourrement, floraison, ponte des oeufs...)

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

Photopériode : Durée de jour, qui varient au cours de l'année

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 5^{ème} 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°)

Solutions fondées sur la Nature (définition UICN) : actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité

USGS : United States Geological Survey ou Institut d'études géologiques des Etats-Unis, fournisseur des images satellitaires Landsat utilisé pour l'étude de la dynamique de végétation dans l'EMB

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