



# Rapport Climat

## Cambiamenti climatici nell'area del Monte Bianco e impatti sulle attività umane

Novembre 2019



# Indice

<b>Riassunto</b>	<b>5</b>
<b>1. Cambiamenti climatici osservati e futuri</b>	<b>9</b>
1.1 Contesto e obiettivi	9
Contesto globale del cambiamento climatico	9
Cambiamento climatico nel Espace Mont-Blanc (EMB)	9
Obiettivi del documento: scenari climatici e settori socio-economici	10
1.2 Cambiamenti climatici recenti osservati nell'area del Monte Bianco	13
Temperatura	13
Precipitazioni	14
Estremi climatici	15
1.3 Proiezioni climatiche nell'area del Monte Bianco per i prossimi decenni	17
Temperature	18
Precipitazioni	21
Giornate fredde	23
Ondate di calore	24
Rischio siccità	28
Precipitazioni forti	29
<b>2. Evoluzione degli ambienti naturali</b>	<b>32</b>
2.1 Riduzione dell'innevamento	32
2.2 Ritiro dei ghiacciai	34
2.3 Degradazione del permafrost	36
2.4 Migrazione altitudinale di fauna e flora	37
2.5 Anticipo della primavera e allungamento della stagione vegetativa	38
2.6 Variazione nella distribuzione delle specie	40
<b>3. Impatti sui settori socio-economici</b>	<b>42</b>
3.1 Risorse idriche	42
3.2 Agricoltura	45
Cicli dei patogeni	45
Viticoltura	48
Gelate tardive	50
Stress termico per le vacche da latte	54
3.3 Foreste	55
Cambiamenti nella composizione dei popolamenti forestali	55
Espansione della foresta	56
Aumento della superficie e della produttività delle foreste di montagna	58
Diffusione di parassiti e patogeni forestali	58
3.4 Conservazione del patrimonio naturale e biodiversità	59
Impatti sulla flora: risalita delle specie	60
Impatti sulla flora della riduzione dell'innevamento	61

Impatti sulla biodiversità e sugli habitat	61
Impatti sulla fauna	62
Impatti sulle strategie di gestione e di conservazione	64
3.5 Turismo	66
Turismo invernale	66
Turismo estivo e fuori stagione	71
L'alpinismo e la sfida climatica	77
Quale futuro per il turismo glaciale nelle Alpi?	80
3.6 Rischi naturali	82
<b>4. Conclusioni</b>	<b>88</b>
<b>Allegato 1 : scelta ed elaborazione dei dati climatici utilizzati</b>	<b>91</b>
Dati spaziali CHELSA	91
Serie temporali sulle stazioni : CH2018	93
<b>Allegato 2 : Bibliografia</b>	<b>94</b>
<b>Allegato 3 : Definizioni e acronimi (definizioni contrassegnate con un * nel testo)</b>	<b>100</b>

## Autori

Edoardo Cremonese<sup>1\*</sup>, Brad Carlson<sup>2\*</sup>, Gianluca Filippa<sup>1</sup>, Paolo Pogliotti<sup>1</sup>, Irene Alvarez<sup>2</sup>, Jean Pierre Fosson<sup>3</sup>, Ludovic Ravanel<sup>4</sup> & Anne Delestrade<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente della Valle d'Aosta (ARPA VdA), Loc La Maladière 48, Saint-Christophe 11020, Italie

[www.arpa.vda.it/climatechange/](http://www.arpa.vda.it/climatechange/)

\* e.cremonese@arpa.vda.it

<sup>2</sup> 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.creamontblanc.org](http://www.creamontblanc.org)

\* bcarlson@creamontblanc.org

<sup>3</sup> Fondazione Montagna Sicura, Località Villard de la Palud, 1, 11013 Courmayeur, Italie

[www.fondazionemontagnasicura.org](http://www.fondazionemontagnasicura.org)

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

Traduzione in italiano della versione francese a cura di Edoardo Cremonese, Paolo Pogliotti e Gianluca Filippa

## Citazione

Cremonese E., Carlson B., Filippa G., Pogliotti P., Alvarez I., Fosson JP., Ravanel L. & Delestrade A. AdaPT Mont-Blanc Rapport Climat: Cambiamenti climatici nell'area del Monte Bianco e impatti sulle attività umane. Redatto nell'ambito del progetto AdaPT Mont-Blanc finanziato dal programma europeo di cooperazione territoriale Alcotra Italia-Francia 2014-2020. Novembre, 2019, 101 p

novembre, 2019

## Riassunto

### *Cambiamenti climatici osservati*

Nel Espace Mont-Blanc (EMB), dalla fine degli anni '80, le temperature medie annue sono aumentate di 0.2/0.5°C per decennio. L'aumento delle temperature ha avuto luogo principalmente in primavera ed estate. Nessuna tendenza significativa è stata osservata nelle precipitazioni annuali. La frequenza dei giorni caldi è aumentata in modo significativo.

### *Cambiamenti climatici attesi*

L'aumento delle **temperature** annuali continuerà: è previsto un **riscaldamento di 1/2°C entro il 2035** rispetto alla media del 1980-2010: il riscaldamento durante l'inverno sarà di circa 1°C e 1.5/2°C in estate. Per il 2050 è atteso un riscaldamento tra 2 e 3°C, ancora più marcato durante la stagione estiva. In estate, l'isoterma\* 0°C salirà di 300 m di altitudine, passando dai 3.800 m di oggi durante la stagione estiva a 4.100 m nel 2050. Entro fine secolo, è previsto un ulteriore riscaldamento di 3/6°C, in funzione degli scenari di emissione di gas a effetto serra considerati.

Nel prossimo futuro (2035) in media (1000-2000 m) e in alta montagna (> 2400 m), si prevede una **riduzione dei giorni di ghiaccio** (numero di giorni con temperatura massima minore di 0°C) di circa il 15/20%; questa riduzione sarà di oltre un mese nel 2050 e fino a due mesi per lo scenario pessimistico entro il 2100. Nei fondovalle, dal 2035, prevediamo di passare da 2 a 6/10 giorni di **ondate di calore\*** **all'anno**, per raggiungere i 15/20 giorni nel 2050.

Per quanto riguarda le **piogge**, c'è maggior incertezza: la quantità totale di precipitazione annua non dovrebbe cambiare rispetto alla media 1980-2010 ma sarà distribuita in modo diverso tra le stagioni. **Le precipitazioni invernali aumenteranno** (5/15%) mentre **le precipitazioni estive diminuiranno** del 5/10% nel 2035 e del 10/20% dal 2050. La combinazione di temperature più alte e precipitazioni ridotte durante il periodo estivo porterà a maggiori **rischi di siccità**: una riduzione del bilancio idrico estivo\* tra il 15/40% è prevista dal 2035 a tutte le altitudini. Si prevede inoltre un aumento della frequenza di **eventi con forti precipitazioni**: la quantità totale di pioggia che cadrà durante i temporali estremi aumenterà del 10/20% nel corso dell'anno, soprattutto in primavera (da marzo a maggio) e in inverno.

### *Impatti sugli ambienti naturali*

I cambiamenti climatici modificano gli ambienti naturali dell'Espace Mont-Blanc. **La durata della copertura nevosa** nei fondovalle e sui versanti meridionali fino a 2000 m si ridurrà di 4/5 settimane rispetto al periodo attuale e di 2/3 settimane a 2500 m. Il **ritiro dei ghiacciai** continuerà ad accelerare nei prossimi decenni. Il riscaldamento in corso continuerà a **degradare il permafrost** ad alta quota, con conseguente aumento della destabilizzazione delle pareti rocciose.

**La flora e la fauna alpine si sposteranno a quote maggiori** per trovare condizioni climatiche favorevoli. I **paesaggi di media ed alta montagna saranno profondamente trasformati**. Alcune specie emblematiche vedranno il loro habitat diminuire o, addirittura, scomparire.

### Acqua

La **portata dei torrenti aumenterà in inverno e in primavera e sarà, al contrario, minore in estate e autunno** a causa della riduzione delle precipitazioni estive e del deflusso nivo-glaciale. L'intensità di queste variazioni dipenderà dalle condizioni specifiche di ciascun corso d'acqua e bacino.

Si prevede una riduzione significativa (15/40%) del **bilancio idrico estivo** (quantità di acqua disponibile nel suolo) dal 2035 a tutte le fasce di quota. Questa riduzione si accentuerà nel 2050 e ancora di più a fine del secolo.

### Agricoltura

L'agricoltura è uno dei settori economici che saranno influenzati dai cambiamenti climatici: l'aumento delle temperature e la modifica dei regimi di precipitazione avranno effetti variabili sulla produttività delle colture. L'aumento delle temperature potrebbe costituire un'**opportunità** in termini di (i) produttività primaria vegetale potenzialmente in aumento del 5/15%, (ii) durata della stagione vegetativa più lunga che potrebbe consentire, ad esempio, tagli aggiuntivi, (iii) o distribuzione delle colture. Ad esempio, aumenterà la **vocazionalità del territorio per alcune vitigni**. Dalle prime analisi sulle tre colture considerate in questo rapporto, si può supporre una riduzione del **rischio di gelate tardive\***, uno dei rischi climatici che possono avere un impatto molto forte sull'agricoltura di montagna. Tale riduzione sarà massima intorno ai 700 m.

Tuttavia, questi benefici potrebbero essere compensati da altri rischi come ad esempio la **riduzione della disponibilità idrica estiva** e la **diffusione di insetti patogeni**: il numero di generazioni all'anno di alcuni insetti dovrebbe aumentare entro il 2035 nei fondovalle. Inoltre nei fondovalle, aumenterà il numero di giorni in cui le vacche da latte subiranno **stress da caldo**, con conseguente riduzione della produzione di latte.

### Foreste e biodiversità

Alcune specie di alberi che non possono migrare o adattarsi rischiano di scomparire localmente e di essere sostituite da nuove specie che arrivano da quote inferiori, in particolare latifoglie. **L'area occupata dalla foresta e la produzione di biomassa aumenteranno** probabilmente a causa del riscaldamento. Tuttavia, la siccità estiva potrà indebolire alcuni popolamenti e rendendoli più vulnerabili da altri fattori di stress biotici o abiotici (parassiti, malattie, eventi estremi ...)

Le specie vegetali e animali **migreranno a quote superiori** verso e oltre i limiti superiori del loro habitat attuale. L'aumento delle specie ad alta quota sarà limitato da una riduzione dell'area disponibile e potrebbe comportare la scomparsa di alcune specie specializzate in ambienti freddi. Il prolungamento della stagione senza neve attenuerà i vincoli climatici che agiscono sulle piante: **la flora e la fauna alpina "specialista" saranno gradualmente sostituite da specie più generaliste e più competitive.**

### *Turismo*

Nel prossimo futuro (2035 e 2050), la **vulnerabilità delle stazioni sciistiche** al di sotto dei 2000 m aumenterà. Per aree sopra i 2000 m, i rischi variano a seconda della configurazione topografica e delle condizioni necessarie all'implementazione dei metodi di gestione della neve (disponibilità di acqua, sostenibilità tecnologica, socio-economica ...). Le **strategie basate sulla produzione di neve artificiale, dovrebbero rimanere efficaci nel prossimo futuro intorno ai 2000 m**, ma è probabile che questa opzione diventerà meno affidabile a fine del secolo.

L'estensione del periodo estivo potrà favorire la destagionalizzazione dei flussi turistici, soprattutto durante i periodi attualmente considerati "fuori stagione", in primavera e in autunno: un **aumento di quasi una settimana nel numero di giorni con condizioni climatiche o piacevoli o eccellenti** è atteso a tutte le quote per i mesi di giugno e ottobre nel prossimo futuro (2035-2050).

Le attività come trekking e alpinismo saranno influenzate dall'aumento delle temperature, dal ritiro dei ghiacciai, dalla degradazione del permafrost, dalla riduzione della neve e dall'aumento della copertura arbustiva e forestale. Queste modifiche avranno un impatto sull'**accessibilità, l'utilizzo e la manutenzione dei sentieri di montagna, in particolare quelli di accesso ai rifugi di alta montagna e i percorsi alpinistici**.

### *Rischi naturali*

L'Espace Mont-Blanc è un territorio particolarmente sensibile ai pericoli naturali legati all'intensificazione del ciclo dell'acqua ed ai cambiamenti nella criosfera (neve, ghiacciai, permafrost). La **degradazione del permafrost** può ridurre la stabilità dei versanti ed impattare le infrastrutture in alta montagna (impianti di risalita, stazioni della funivia, strade, edifici, ...). Il **ritiro dei ghiacciai**, portando alla destabilizzazione delle morene laterali e delle pareti rocciose, può causare l'aumento dell'instabilità dei pendii. Il rischio di collasso delle **parti terminali dei ghiacciai sospesi o a forte pendenza** sarà aggravato nei prossimi anni. Oltre alla fusione accelerata dei ghiacciai, il fenomeno delle alluvioni innescato dall'improvviso svuotamento di sacche d'acqua o **laghi glaciali** potrebbe aumentare. Per quanto riguarda il **rischio di valanghe**, è prevista una riduzione del pericolo in bassa quota e una modifica delle caratteristiche delle valanghe in alta quota. Il **rischio di alluvioni** e inondazioni, sia a causa di cambiamenti nella criosfera sia a causa della maggiore frequenza di eventi di precipitazione intensa, aumenterà nei prossimi anni. È anche molto importante considerare che i pericoli naturali in un contesto di alta montagna come l'Espace Mont-Blanc possono agire in **modo sinergico e additivo**, con conseguenti effetti a cascata. Tutte le strategie di adattamento al rischio nel EMB devono tenere conto di queste possibilità di interazione tra i pericoli.

## 1. Cambiamenti climatici osservati e futuri

### 1.1 Contesto e obiettivi

#### *Contesto globale del cambiamento climatico*

Il cambiamento climatico è un fenomeno che trascende i confini amministrativi, sia nelle sue origini che nelle sue conseguenze.

**Il cambiamento climatico è in atto ed è dovuto al forte aumento della concentrazione atmosferica di gas a effetto serra\* derivanti dalle attività umane.**

#### **BOX 1 : dai modelli globali agli scenari locali**

Le analisi presentate in questo rapporto si basano su tre scenari di evoluzione delle concentrazioni atmosferiche di gas a effetto serra: uno scenario di mitigazione basato su una riduzione molto forte delle emissioni (RCP2.6), uno scenario intermedio (RCP4.5) e uno scenario più pessimistico che non prevede riduzioni significative delle emissioni (RCP8.5). Come riferimento, si tenga presente che, a livello globale, le emissioni di gas serra sono cresciute di circa 2.1% nel 2018, mentre per il 2019 è previsto una diminuzione di tale crescita a 0.9% (-0.2/+1.5 %) (WMO 2019c, Global Carbon Budget 2019, Friedlingstein et al., 2019). Questo livello di emissioni ci pone su una traiettoria di concentrazioni simile al RCP4.5. Per maggiori dettagli sugli scenari climatici, vedere l'Allegato 1.



#### *Cambiamento climatico nel Espace Mont-Blanc (EMB)*

Il cambiamento climatico in montagna è un fenomeno attuale che si intensificherà ulteriormente nei prossimi anni.

Gli impatti del cambiamento climatico sono amplificati in contesti geografici ed economici come quelli del EMB. Il territorio del EMB è caratterizzato dalla stretta prossimità di rilievi eccezionali e vallate e versanti in cui si concentrano le attività umane. La natura stessa della relazione tra società e ambiente nel EMB impone una fortissima connessione geografica, economica e sociale tra l'alta quota ed il fondovalle creando un legame diretto tra le diverse dinamiche del territorio. Inoltre, l'EMB è caratterizzato da un enorme dislivello (+ 4.300 m di altitudine), e quindi da variazioni di temperatura, uniche in Europa. Esistono condizioni climatiche molto varie, da un clima quasi mediterraneo nelle valli svizzere e italiane a un clima quasi polare in alta quota. Questa diversità climatica determina impatti dei



cambiamenti climatici molto localizzati e diversificati. Per tali ragioni, oltre alle evidenti implicazioni gestionali ed operative di una migliore comprensione degli effetti dei cambiamenti climatici, il territorio del EMB è anche un laboratorio eccezionale per questo esercizio conoscitivo.

I cambiamenti climatici causano la variazione di una serie di parametri climatici su scala locale. Questi parametri modificano direttamente le caratteristiche della montagna e dell'ambiente naturale impattando a loro volta le attività umane. Pertanto, i cambiamenti climatici incidono, direttamente ed indirettamente, sulle condizioni economiche, sociali e culturali degli abitanti del EMB:

- direttamente attraverso i fattori climatici: temperatura e precipitazioni;
- indirettamente, ma a un livello più profondo, attraverso impatti sulla criosfera e sulla biosfera

Questa catena di impatti è stata schematizzata in Figura 1.1.

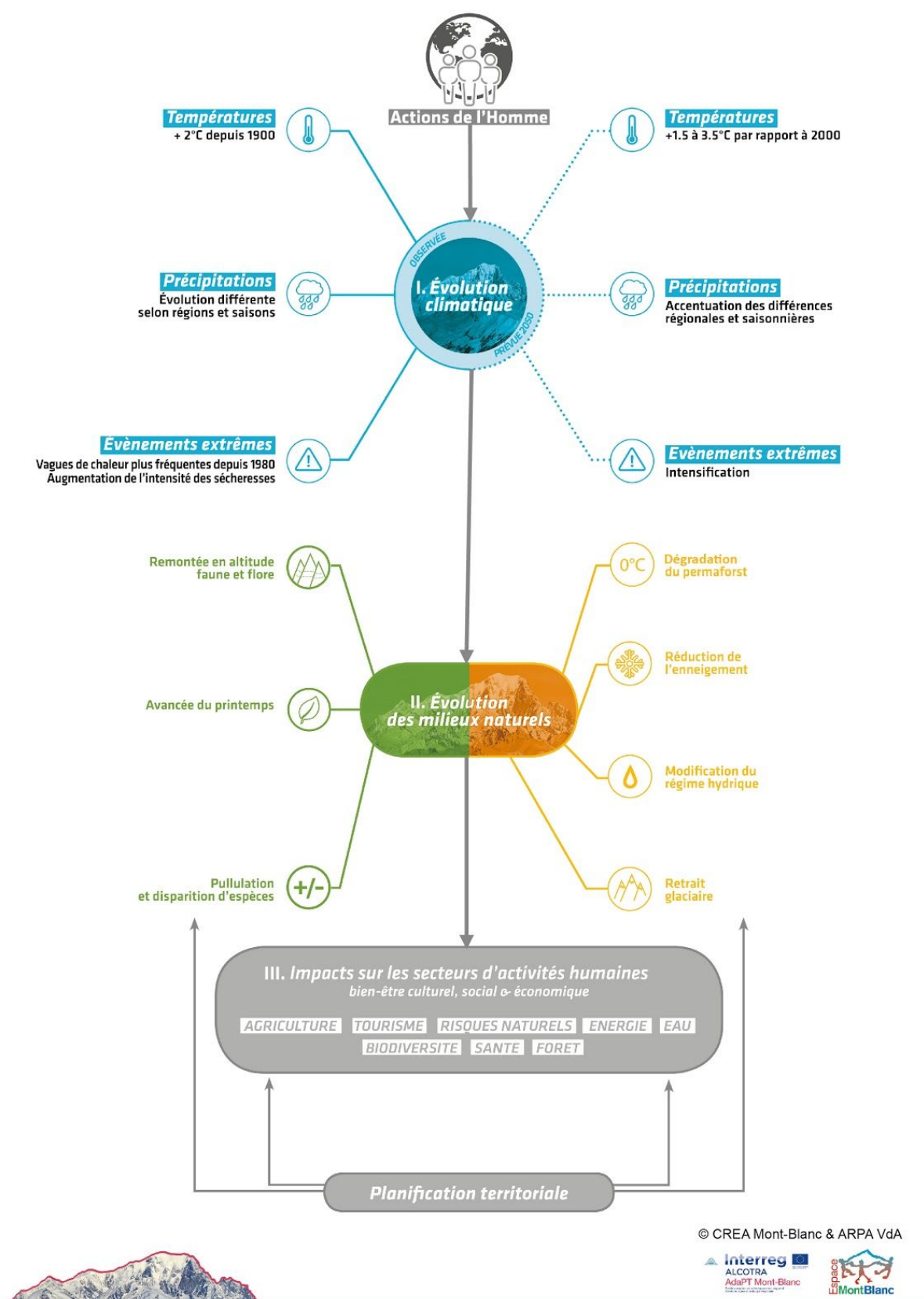
### *Obiettivi del documento: scenari climatici e settori socio-economici*

L'obiettivo di questo rapporto è realizzare *i)* un'analisi degli scenari dei cambiamenti climatici nell'area del Monte Bianco, e valutare gli impatti *ii)* sugli ambienti naturali e *iii)* sulle attività umane. Nella definizione del quadro di riferimento del rapporto, si è partiti dalla messa in comune della principali necessità di informazioni ed approfondimenti manifestate dai portatori di interesse locali e regionali, a livello del EMB. In questo spirito, abbiamo collaborato tra partner svizzeri, francesi e italiani per:

- sintetizzare e presentare i dati disponibili nel modo più omogeneo possibile tra i tre paesi che confinano con il massiccio del Monte Bianco
- definire, nell'ambito di un approccio partecipativo (WP2 del progetto Adapt Mont-Blanc) i settori socio-economici prioritari su cui focalizzare le analisi di impatto.

L'obiettivo di questo rapporto è presentare un quadro sintetico degli scenari climatici attesi nell'area del Monte Bianco e dei relativi impatti sugli ambienti naturali e su settori socio-economici prioritari. Per ambienti naturali intendiamo la criosfera (ghiacciai, copertura nevosa, permafrost) e la biosfera (biodiversità, ecosistemi, ecc.). Tra le molte attività umane che sono influenzate dai cambiamenti climatici i seguenti settori sono stati identificati come prioritari dagli attori locali: risorse naturali (acqua, agricoltura, foreste, biodiversità, ecc.) , turismo e rischi naturali. Per questo motivo altri settori molto importanti come, ad esempio, salute, energia, trasporti, non sono inclusi in questo rapporto.

I principali destinatari del documento sono tecnici, funzionari e decisori politici delle amministrazioni locali e regionali dell'area del Espace Mont-Blanc.



**Figura 1.1. Schema riassuntivo della sequenza degli impatti dei cambiamenti climatici sulle attività umane.** È secondo questa impostazione che è strutturato il rapporto.

#### **BOX 2 : Meteo o clima?**

Per studiare e comprendere gli impatti dei cambiamenti climatici, è essenziale distinguere tra tempo meteorologico (meteo), che si riferisce a eventi climatici a breve termine (giorni-anni), e clima, che si riferisce a tendenze a lungo termine, definito su periodi almeno 30 anni.

Il clima si riferisce quindi alle medie dei valori meteorologici osservati o previsti. Come ogni media, include valori sopra e sotto la media. Pertanto, una riduzione delle nevicate medie rispetto al trentennio 1960-1990 (clima) non esclude anni eccezionalmente nevosi come il 2018 (meteo).

La struttura di questo rapporto segue la logica proposta nella Figura 1.1. Nella prima parte (1.2), forniamo un riepilogo dell'evoluzione climatica osservata negli ultimi anni. Gli scenari climatici per i prossimi decenni, nonché l'evoluzione di una selezione di indici di impatto sono presentati nella sezione 1.3. I principali effetti sugli ambienti naturali e sui settori socio-economici prioritari sono presentati nelle sezioni 2 e 3. Nell'allegato 1 si trovano i dettagli metodologici e le fonti dei dati utilizzati. Riferimenti agli articoli citati o relazioni scientifiche sono nell'allegato 2, L'elenco degli acronimi utilizzati è disponibile nell'allegato 3.

## 1.2 Cambiamenti climatici recenti osservati nell'area del Monte Bianco

A livello globale, il riscaldamento osservato dalla metà del XIX secolo è senza precedenti ed estremamente rapido (IPCC 2018, SR1.5). L'attuale concentrazione atmosferica di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), il principale gas a effetto serra, ha superato nel 2018 le 407 parti per milione (ppm, WMO 2019b), raggiungendo valori mai osservati negli ultimi 3-5 milioni di anni. A livello globale, sedici degli ultimi diciassette anni sono stati i più caldi mai registrati.

**Dal 1864 nelle Alpi abbiamo osservato un riscaldamento delle temperature medie annuali di circa 2°C, che è più del doppio rispetto al riscaldamento avvenuto a scala globale di +0.9°C (CH2018 \*).**

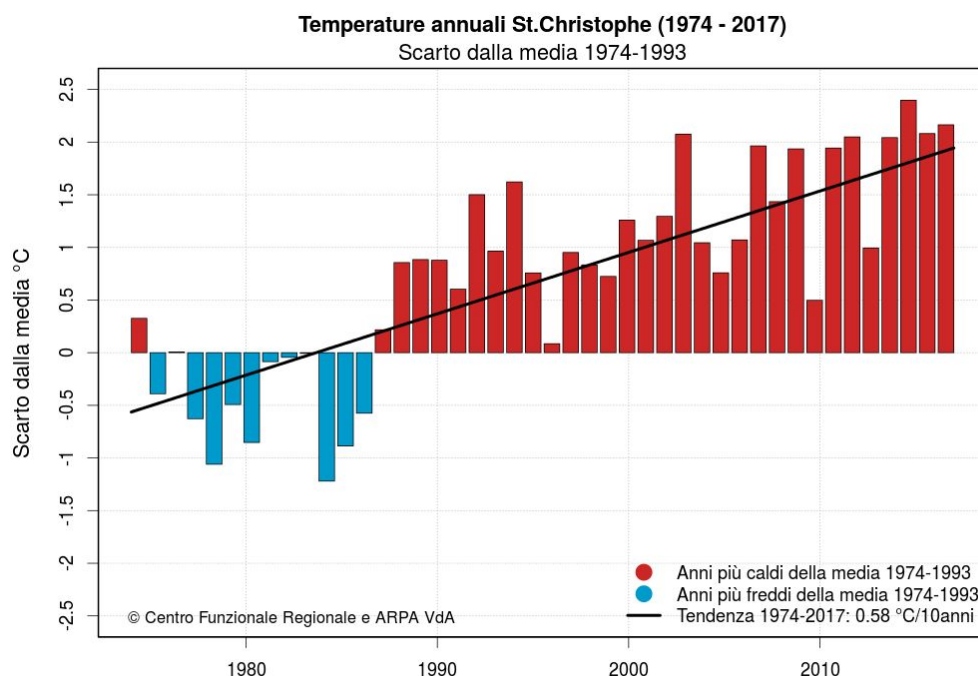
### BOX 3 : Sì, ma l'optimum climatico medievale ... ?

Il clima in Europa e nelle Alpi è cambiato in modo significativo nelle ultime migliaia di anni, compresa l'ultima era glaciale di Würm che termina circa 11.000 anni fa (Davis et al. 2003). Più recentemente, l'Europa ha vissuto un periodo relativamente caldo e umido (il cosiddetto "optimum climatico medievale") tra il 900 e il 1350, seguito da un periodo freddo e umido tra il 1300 e il 1850, la Piccola era glaciale (Kress et al., 2014).

Molteplici studi, tra cui uno recentemente pubblicato su Nature, la più prestigiosa rivista scientifica mondiale (Neukom et al., 2019), hanno però dimostrato che **le variazioni climatiche degli ultimi 2000 anni non sono mai state così intense, omogenee e rapide come il riscaldamento avvenuto negli ultimi decenni causato dalle emissioni umane di gas serra.**

### Temperatura

L'aumento di temperatura è stato particolarmente marcato dalla fine degli anni '80, con **un aumento osservato di 0.2/0.5°C per decennio** (Gobiet et al., 2014, Météo-France, Météo-Suisse, Centro Funzionale Valle d'Aosta; figura 1.2). Questo aumento è approssimativamente equivalente alla differenza di temperatura che può essere osservata tra due altitudini separate da 100 m di differenza di quota. A questo ritmo, per rimanere alle stesse condizioni di temperatura, sarebbe quindi necessario salire 100 m di dislivello ogni 10 anni. In termini di stagionalità, nelle Alpi **il riscaldamento misurato è particolarmente marcato in primavera ed estate**. In Valle d'Aosta, ad esempio, c'è un riscaldamento medio di 0.58°C per decennio, ma questo riscaldamento è di 0.81°C in primavera e 0.72°C in estate (Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta e ARPA VdA).



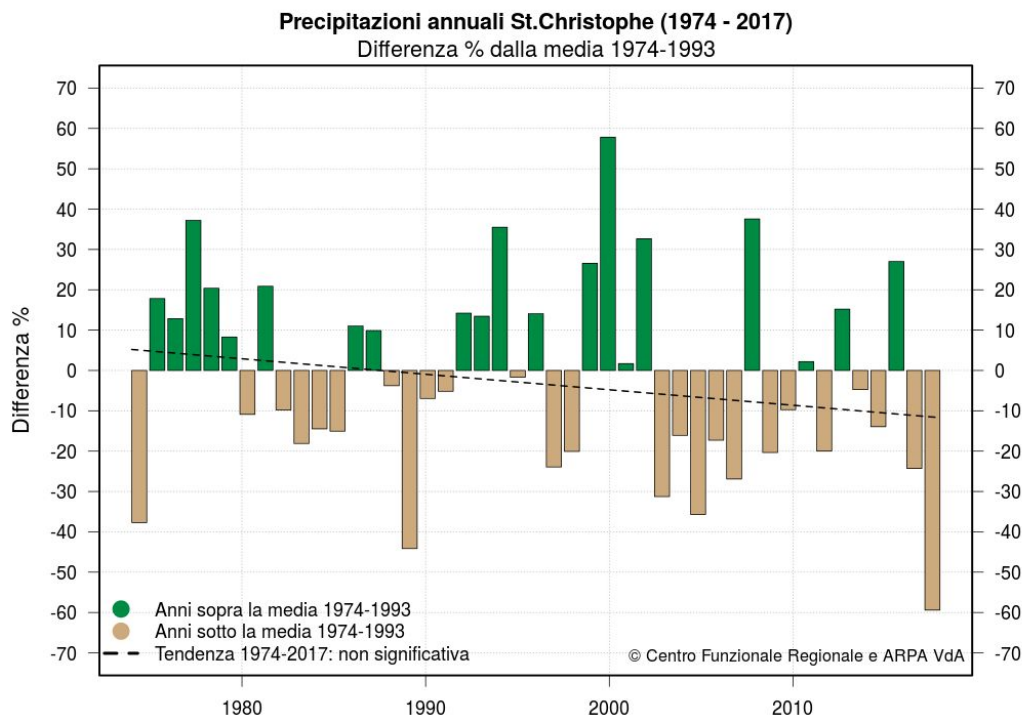
**Figura 1.2. Aumento delle temperature medie annue dal 1974.** Questo grafico mostra la differenza delle temperature medie annue rispetto alla media del periodo 1974-1993 a Saint Christophe in Valle d'Aosta. Notiamo l'accelerazione dell'aumento delle temperature dalla fine degli anni '80.

### Precipitazioni

A livello del Espace Mont-Blanc, il regime delle precipitazioni, a differenza della temperatura, non è cambiato nel corso degli ultimi decenni, ma è aumentata la differenza tra regioni e stagioni (Météo-France, Météo-Suisse, Centro Funzionale Valle d'Aosta - Figura 1.3)

#### BOX 4 : Le stagioni in climatologia

In climatologia le stagioni sono diverse da quelle astronomiche: Inverno: dicembre/gennaio/febbraio, **DJF**; Primavera: marzo/aprile/maggio, **MAM**; Estate: giugno/luglio/agosto, **JJA**; Autunno: settembre/ottobre/novembre, **SON**



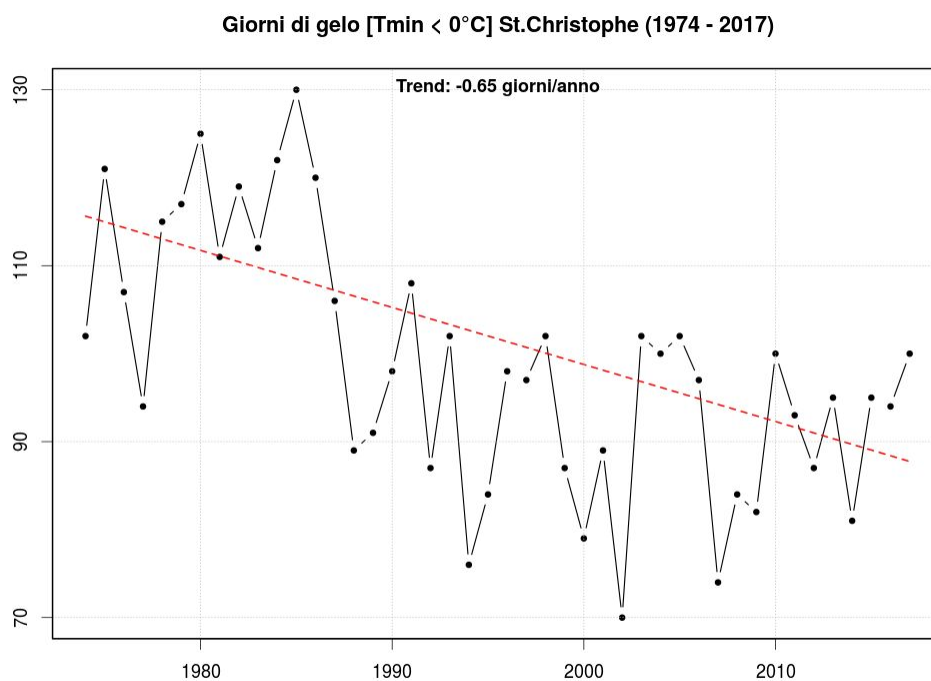
**Figura 1.3. Evoluzione delle precipitazioni annuali dal 1974.** Questo grafico rappresenta la differenza nelle precipitazioni medie annue rispetto alla media per il periodo 1974-1993 a Saint Christophe in Valle d'Aosta. La tendenza alla diminuzione osservata negli ultimi anni non è significativa.

### Estremi climatici

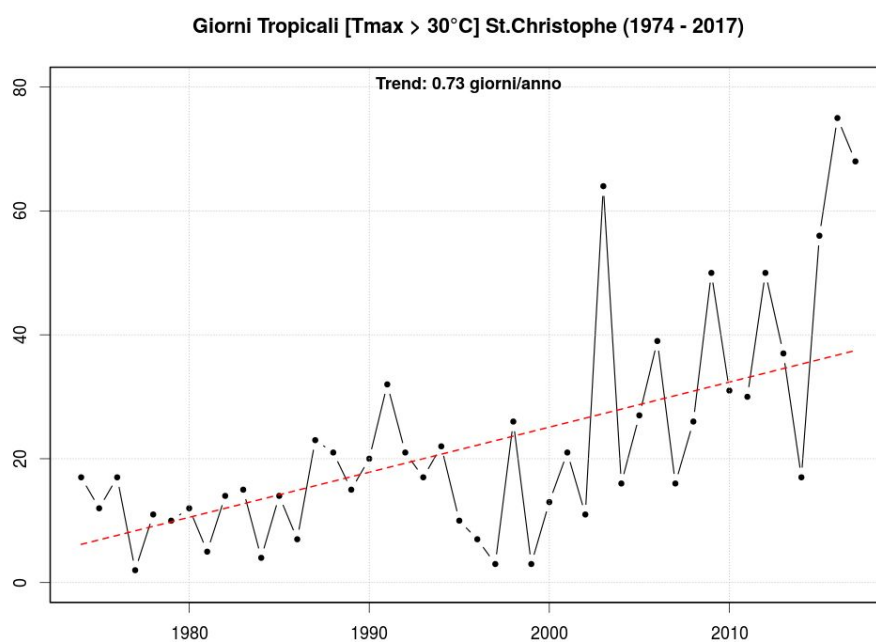
I cambiamenti climatici non si traducono solo in una variazione dei valori medi di temperatura e precipitazione ma anche in una variazione nelle frequenza degli eventi estremi: diventano più comuni deviazioni più marcate rispetto alla situazione media. Nel EMB, questo aumento di eventi estremi ha finora comportato un aumento della frequenza e della durata delle ondate di calore estive; il numero di giorni di gelo (numero di giorni all'anno con temperature minime inferiori a 0°C) si è ridotto di circa 6,5 giorni per decennio (Figura 1.4). In primavera, l'aumento delle temperature è stato accompagnato da una maggiore esposizione agli eventi di gelo primaverile (gelate tardive): sopra un'altitudine di 800 m, il rischio di gelate tardive è aumentato del 20/40% tra il 1975 e il 2016 (Vitasse et al., 2018).

Sono aumentate le ondate di calore (giorni "tropicali", numero di giorni all'anno con temperature massime superiori a 30°C). In Valle d'Aosta, ad esempio, questo aumento è stato di 7.3 giorni per decennio (Figura 1.5). Questa intensificazione delle ondate di calore sembra essere stata particolarmente marcata dagli anni 2000. Le ondate di calore sono più intense e più frequenti, come mostrato ad esempio dal 2003, 2016 e 2017.

Un evento di siccità è un periodo prolungato di mancanza o insufficiente precipitazione, che si traduce in un deficit idrico. In tutta la Svizzera, non c'è stato un aumento significativo della durata e dell'intensità della siccità dalla fine del XIX secolo (Meteo Svizzera). Nel EMB, ad oggi, non si osserva una chiara tendenza all'intensificazione dei fenomeni di siccità, ma un forte aumento della variabilità e della frequenza negli ultimi anni (Figura 1.6).



**Figura 1.4. Evoluzione del numero di giorni di gelo** (temperatura minima giornaliera inferiore a  $0^{\circ}C$ ) all'anno a Saint Christophe in Valle d'Aosta tra il 1974 e il 2017. Il numero di giorni di gelo si è ridotto di 6.5 giorni per decennio.



**Figura 1.5. Evoluzione del numero di giorni "tropicali"** (temperatura massima giornaliera superiore a  $30^{\circ}C$ ) all'anno a Saint Christophe in Valle d'Aosta tra il 1974 e il 2017. Si nota un forte contrasto tra gli anni, ad esempio le ondate di calore del 2003, il 2016 e il 2017 sono state particolarmente forti e una forte tendenza verso un aumento del numero di giorni tropicali (7.3 giorni per decennio).

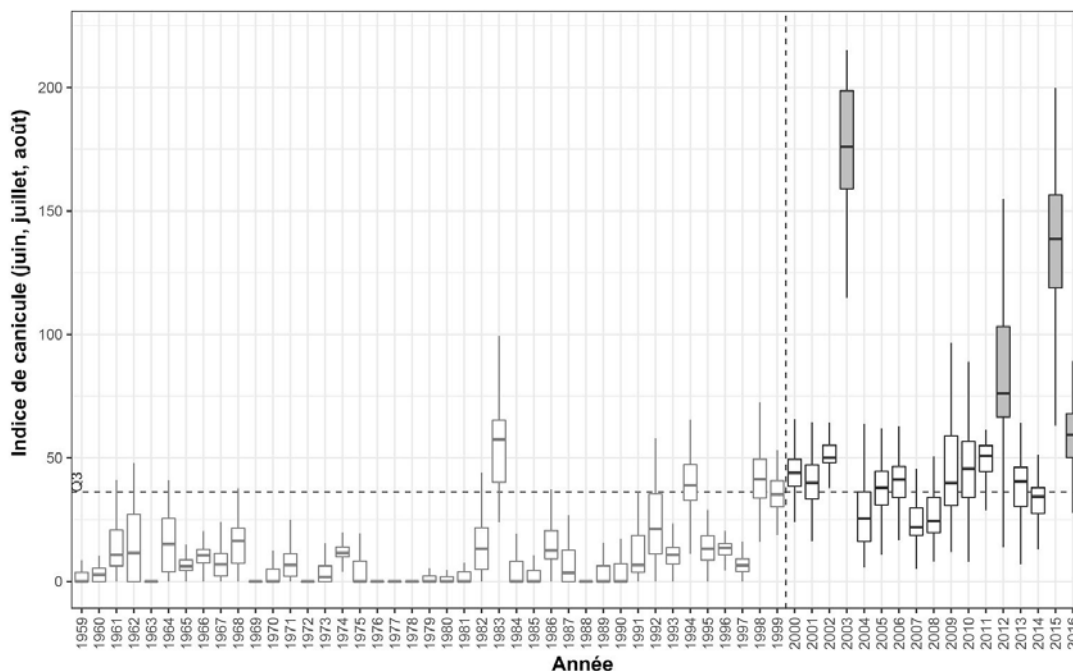


Figura 1.6. Evoluzione dell'indice delle ondate di calore nei pascoli alpini delle Alpi francesi (Corona-Lozada et al., 2019).  
Fonte: LECA\*

### 1.3 Proiezioni climatiche nell'area del Monte Bianco per i prossimi decenni

Gli scenari climatici indicano un'accentuazione delle tendenze già osservate. Si prevede in particolare un continuo progressivo aumento delle temperature, in tutte le stagioni, accompagnato da una redistribuzione stagionale delle precipitazioni. Gli scenari presentati si basano su tre tipologie di dati:

- analisi bibliografica dei lavori esistenti a livello alpino
- gli scenari climatici prodotti da MétéoSuisse (CH2018)
- una proiezione dei dati climatici di CHELSA \* (Karger et al., 2017) disponibili su scala globale, e adattati alla scala del EMB.

Per ciascun modello climatico, vengono considerati tre scenari di emissioni di gas a effetto serra (cfr. BOX 1): uno scenario più ottimistico "RCP2.6" basato su una riduzione molto forte delle emissioni entro la fine del secolo, un intermedio "RCP 4.5" e uno scenario più pessimistico "RCP8.5" basato su una continuazione del tasso di emissione attuali. Da tenere presente che, a livello globale, le emissioni di gas serra sono cresciute di circa 2.1% nel 2018, mentre per il 2019 è previsto una diminuzione di tale crescita a +0.9% (-0.2/+1.5 %) (WMO 2019c, Global Carbon Budget 2019, Friedlingstein et al., 2019). Questo livello di emissioni ci pone su una traiettoria di concentrazioni simile al RCP4.5. L'allegato 1 illustra in dettaglio la scelta e l'uso di questi set di dati per ottenere indicatori, mappe ed elaborazioni presentati nel rapporto.

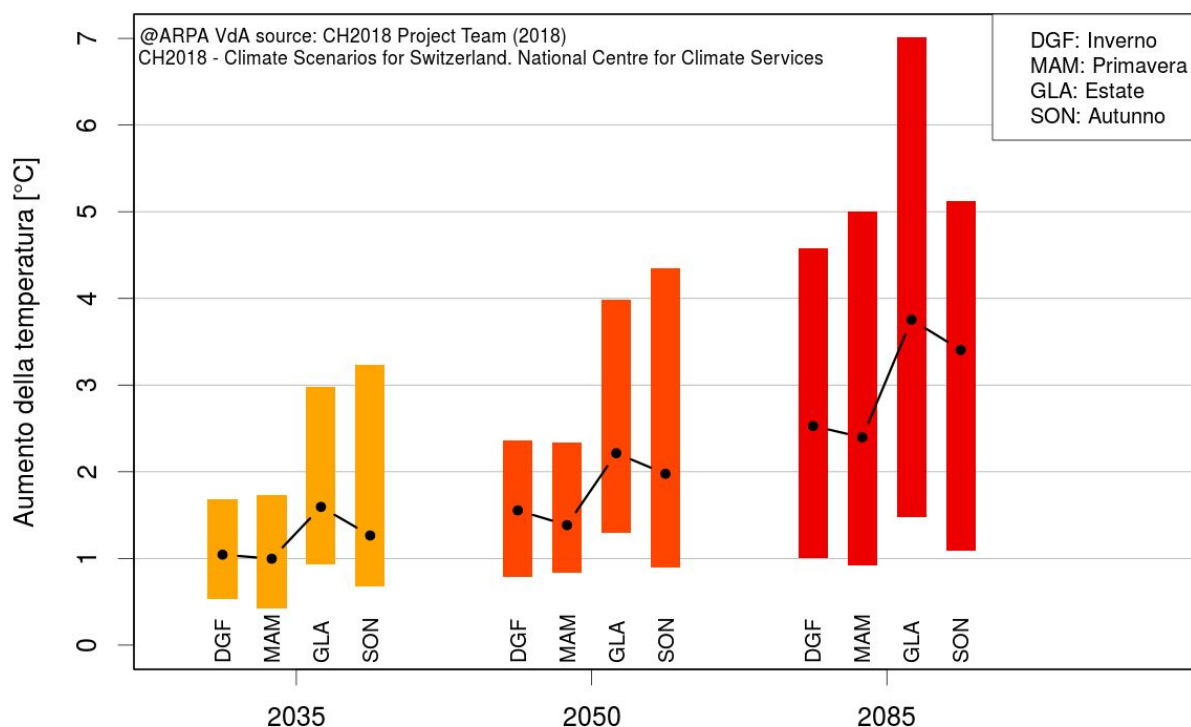


**BOX 5 : Leggere i grafici: media e incertezza**

Un indice climatico è espresso da una cifra che rappresenta un valore medio o mediano (in un grafico in generale un punto o una curva), all'interno di un margine di incertezza (in un grafico spesso indicato con una barra o una linea).

*Temperature*

Le temperature medie annue continueranno ad aumentare, tra +1°C e +3°C nel 2035 a seconda degli scenari di emissione utilizzati, rispetto al periodo 1980-2010. Nel corso dei decenni, i diversi scenari diventano sempre più divergenti con un aumento delle temperature ancora più marcato nello scenario pessimistico: questa divergenza è spiegata dall'inerzia del clima in relazione all'aumento della concentrazione di gas a effetto serra: gli effetti delle emissioni di oggi sono ritardati nel tempo. Nello scenario RCP 4.5, l'inerzia rimane elevata a breve termine (a causa delle nostre emissioni passate) ma più debole nel lontano orizzonte (oltre il 2050) rispetto allo scenario RCP 8.5. in cui le nostre emissioni continuano ad aumentare.

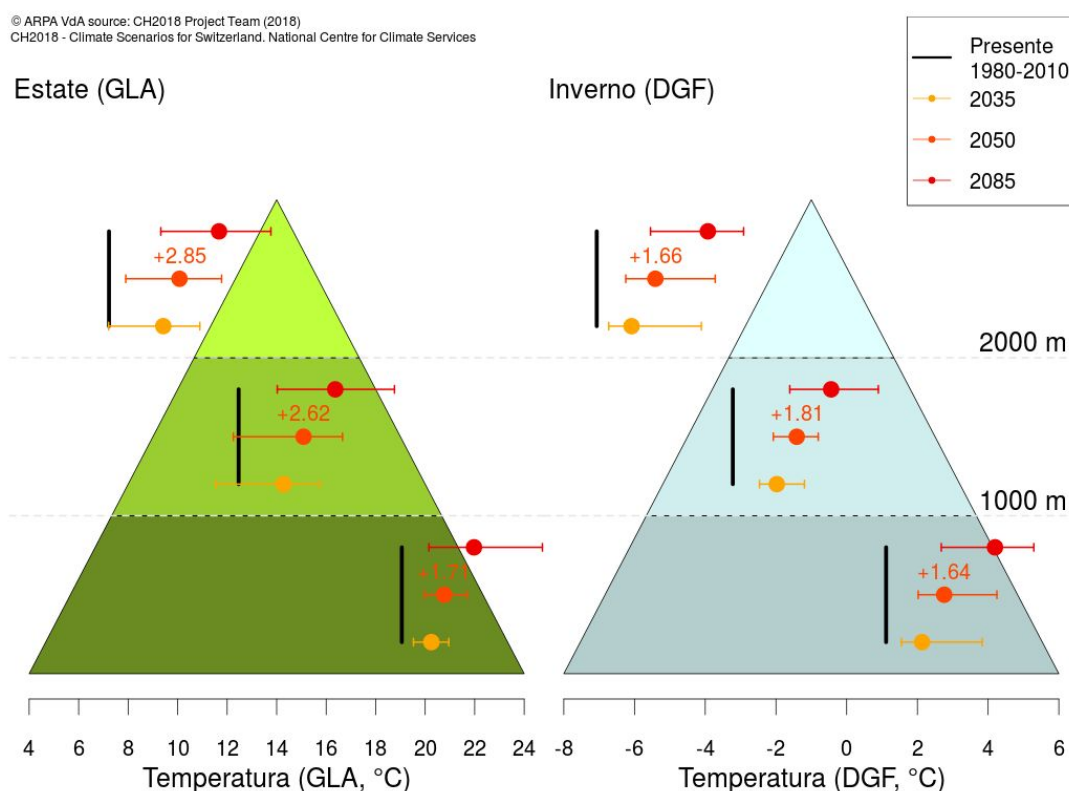
**Aumento della temperatura**

**Figura 1.7. Variazione della temperatura media per stagione per l'EMB per tre periodi futuri (2035, 2050 e 2085).** I dati sono la sintesi di vari scenari (RCP2.6, 4.5 e 8.5) e modelli climatici. Le barre rappresentano la gamma di incertezza, che aumenta nel corso dei decenni (soprattutto da quando gli scenari di emissione dei gas serra divergono).

Le temperature continueranno ad aumentare in tutte le stagioni, in particolare in estate ed in autunno (Figura 1.7). Dal 2050, nello scenario intermedio (RCP 4.5), l'aumento delle temperature nel EMB sarà maggiore rispetto all'obiettivo fissato dagli accordi di Parigi nel 2015. Non prevediamo differenze marcate nell'aumento delle temperature lungo il dislivello in inverno, mentre in estate l'incremento sarà maggiore in media e alta montagna. (Figura 1.8).

#### BOX 6 : fondovalle / media montagna / alta montagna

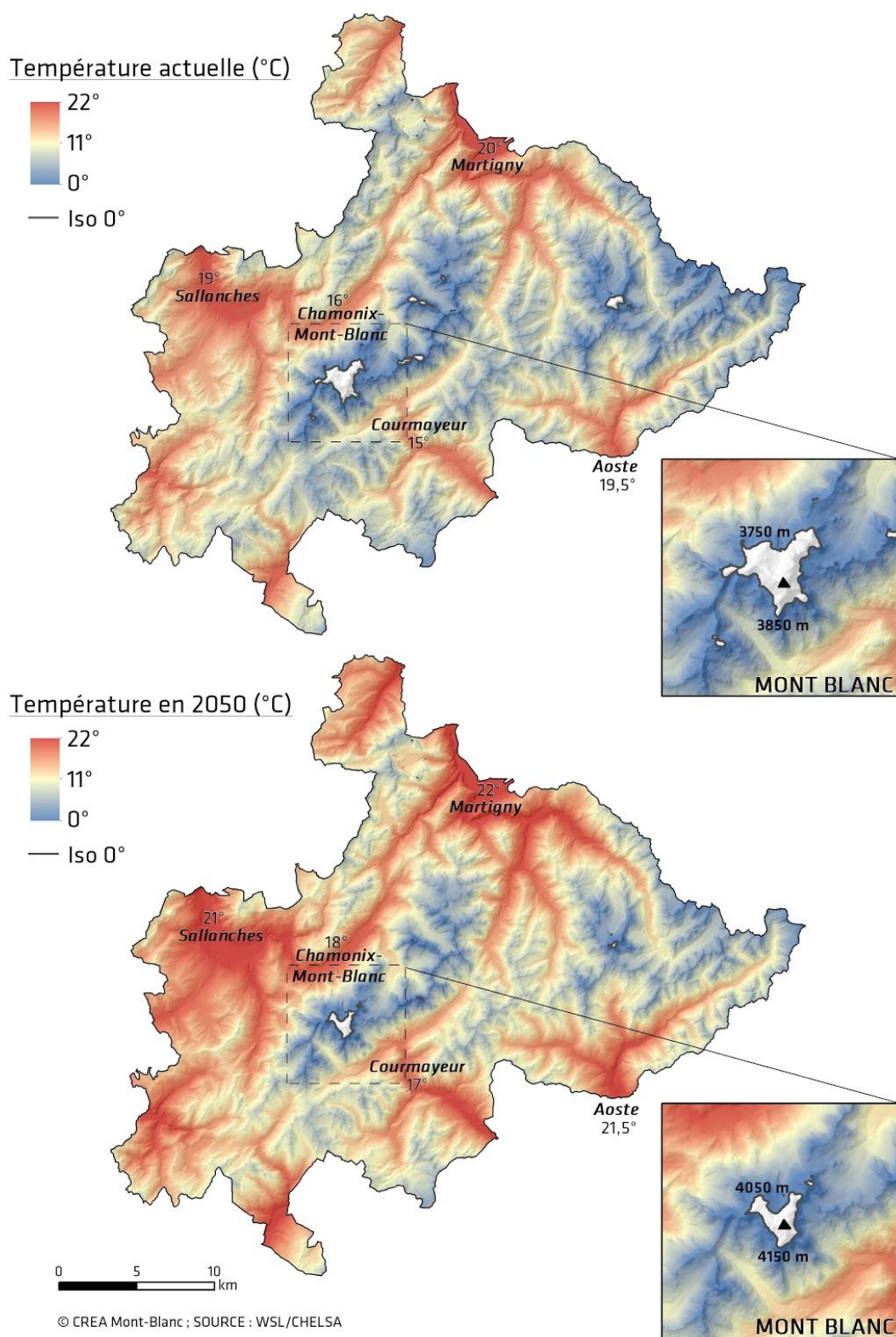
Alcune analisi contenute nel rapporto sono è presentata per le diverse fasce di altitudine del EMB: fondovalle (400-1000 m), media montagna (1000-2000 m) e alta montagna (> 2400 m).



**Figura 1.8. Variazione delle temperature medie invernali ed estive per l'EMB per tre periodi futuri (2035, 2050 e 2085) e per tre fasce altitudinali (fondovalle, media montagna centrale e alta montagna).** I punti rappresentano la media dei tre scenari di emissione. Le barre rappresentano l'intervallo di incertezza, tutti gli scenari e tutti i modelli. Le linee nere verticali rappresentano i valori medi per il periodo 1980-2010.

Nel 2050 in estate, l'isoterma\* 0°C salirà di 300 m di altitudine, da 3.800 m a 4.100 m lasciando solo alcune aree ridotte del massiccio del Monte Bianco al riparo dalla fusione (Figura 1.9). Nello scenario più pessimistico (RCP 8.5), questo aumento di quota potrebbe essere anche di 400 m. Nel 2050 in primavera, l'isoterma 0°C salirà da circa 2200m a 2400-2500m, a seconda dello scenario climatico e della pendenza.

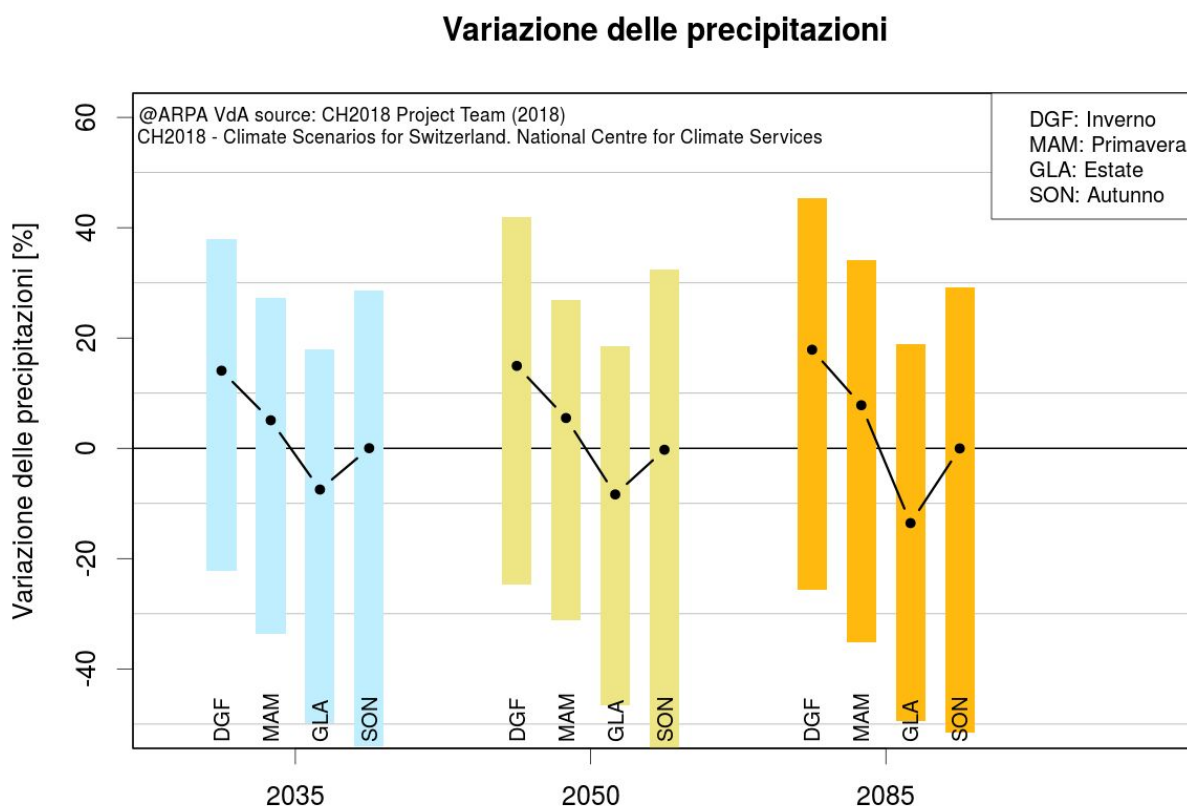
## TEMPERATURE MOYENNE ESTIVALE - RCP 4.5



**Figura 1.9. Temperature estive medie oggi e nel 2050 nell'Espace Mont-Blanc, secondo lo scenario mediano RCP 4.5.** Si nota che solo la vetta del Mont-Blanc e alcune alte vette intorno (Grandes Jorasses, Grand Combin) rimangono al di sopra del limite di disgelo.

### Precipitazioni

Per quanto riguarda le precipitazioni annuali, l'incertezza rimane elevata e gli scenari prevedono che le precipitazioni annuali non cambieranno nettamente (-10%/+10%). Tuttavia, si prevede un aumento delle precipitazioni invernali (+15%/+20%) con in particolare un aumento delle precipitazioni piovose e una riduzione delle precipitazioni nevose al di sotto di 2300/2500 m. Allo stesso tempo è previsto anche un calo delle precipitazioni estive di circa -10%/-20% dal 2035. Per gli altri periodi dell'anno vi è una grande incertezza (Figura 1.10).

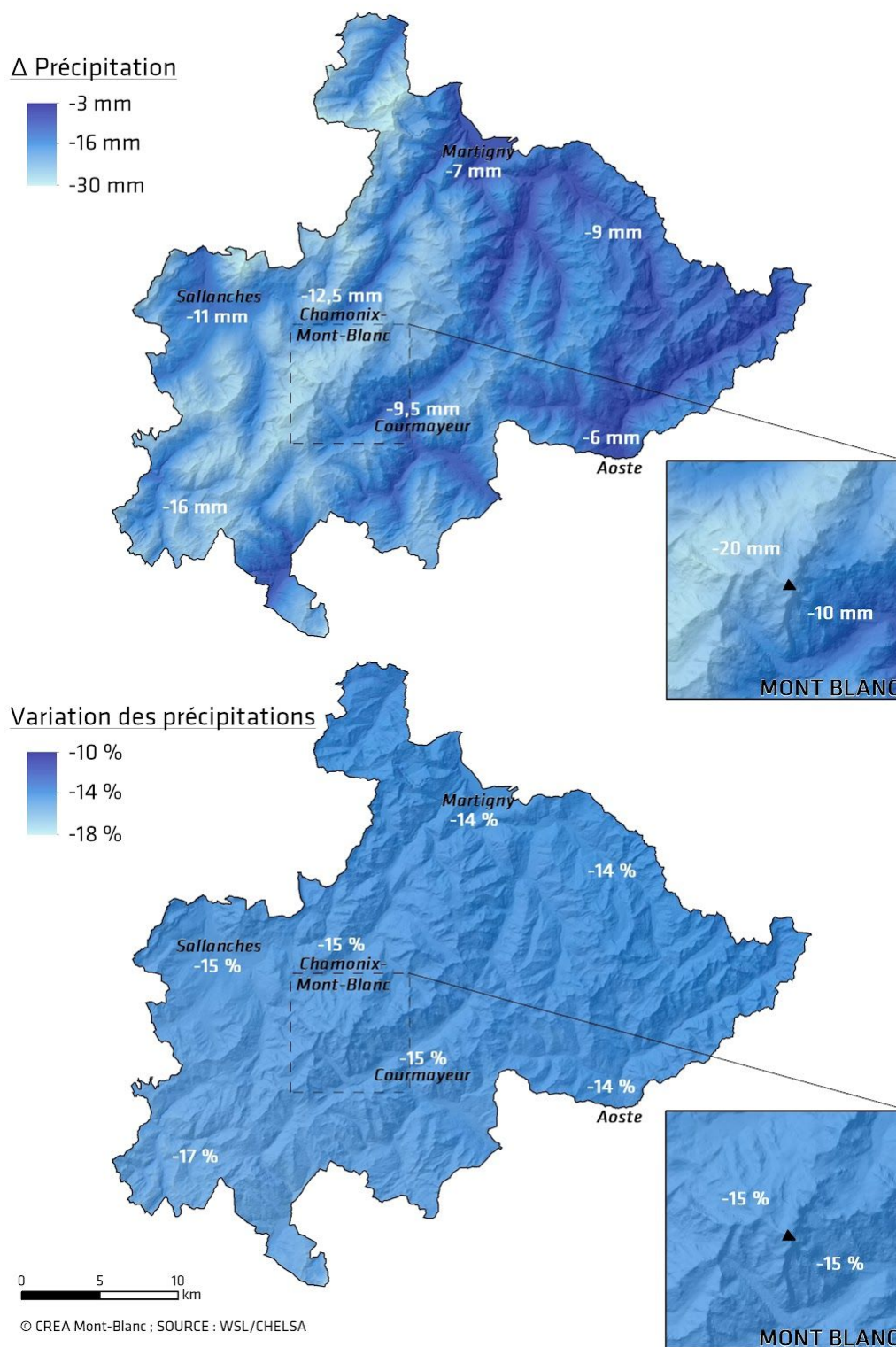


**Figura 1.10. Variazione percentuale delle precipitazioni stagionali per l'EMB per tre date future (2035, 2050 e 2085).** Le barre rappresentano l'intervallo di incertezza, combinando tutti gli scenari e i modelli

Considerato il significativo aumento delle temperature estive, si attende un rischio maggiore di ondata di calore e siccità nei decenni a venire. È importante notare che la diminuzione delle precipitazioni è maggiore nella parte occidentale del EMB (Figura 1.11), in valore assoluto e non in percentuale poiché questa regione riceve attualmente più precipitazioni. Se la variazione delle precipitazioni estive sembra relativamente costante in funzione dell'altitudine (Figura 1.12), i modelli prevedono un maggiore aumento delle precipitazioni invernali in alta montagna.

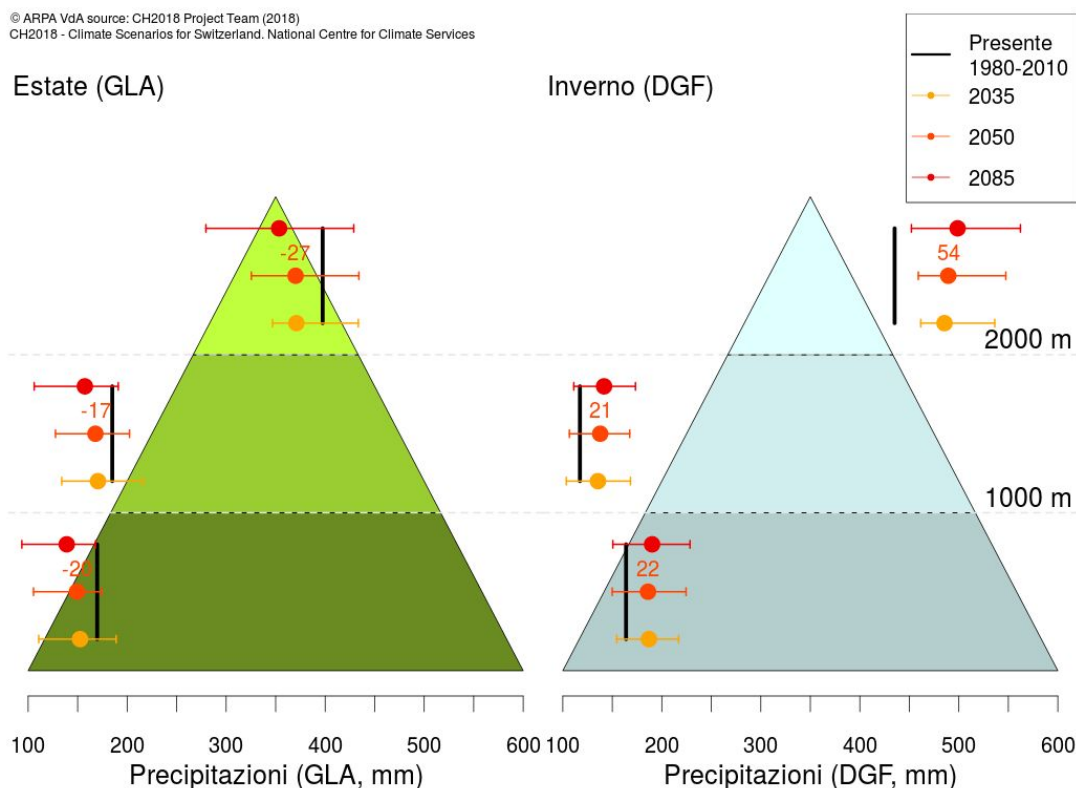


## VARIATION DES PRECIPITATIONS ESTIVALES (actuel à 2050 - RCP 4.5)



**Figura 1.11. Variazione delle precipitazioni estive, secondo lo scenario RCP 4.5.** Vi è una riduzione di circa il 15% delle precipitazioni su tutto il territorio, che aumenta al 18% nel caso dello scenario RCP 8.5.

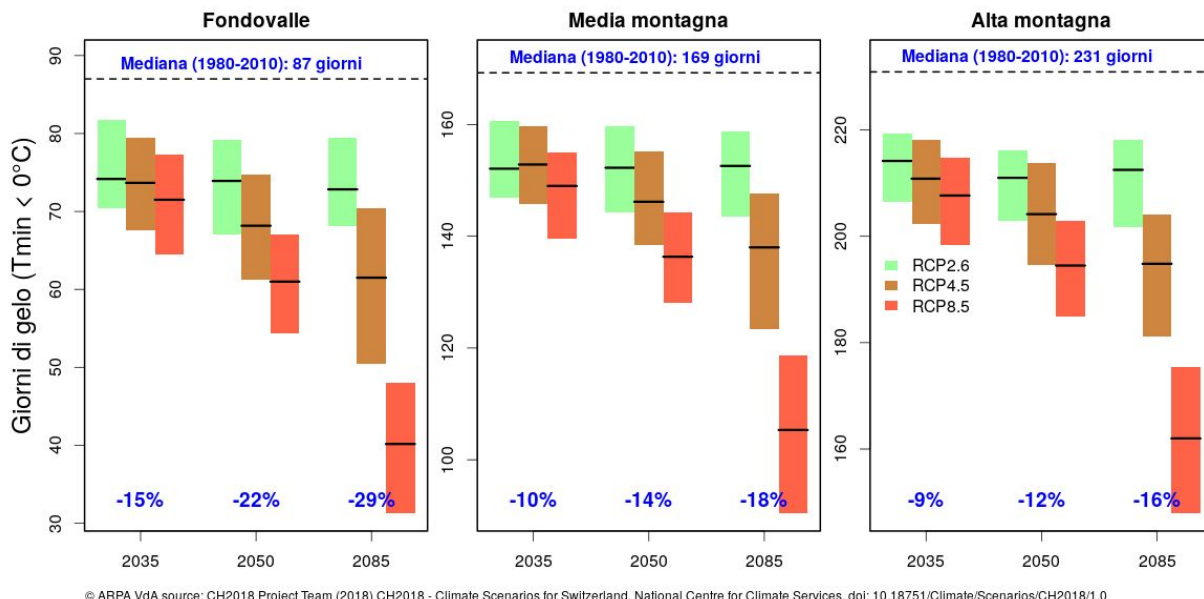
© ARPA VdA source: CH2018 Project Team (2018)  
CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland. National Centre for Climate Services



**Figure 1.12. Variazione delle precipitazioni invernali ed estive per tre periodi futuri (2035, 2050 e 2085) e per tre fasce altitudinali (fondo valle, media montagne centrali e alta montagna).** I punti rappresentano la media dei 3 scenari di emissione. Le barre rappresentano l'intervallo di incertezza, tutti gli scenari e tutti i modelli. Le linee nere verticali rappresentano i valori medi per il periodo 1980-2010.

### Giornate fredde

Oltre all'aumento delle temperature e alla redistribuzione stagionale della frequenza e dell'intensità delle precipitazioni, tutti gli scenari climatici prevedono un aumento del verificarsi di eventi estremi. Si prevede in media una riduzione significativa del **numero di giorni di gelo** (numero di giorni all'anno con temperatura minima  $<0^{\circ}\text{C}$ ) di -20/-80 giorni all'anno da qui al 2085 (Figura 1.13) con un impatto diverso a seconda dell'altitudine considerata. La riduzione più marcata è prevista in fondovalle. In questa fascia di altitudine prevediamo una riduzione del 15% dal 2035 (circa 15 giorni) fino al 30% entro la fine del secolo. Per altre altitudini, prevediamo nel 2035 una riduzione di circa il 10% e del 16%/18% entro la fine del secolo. Nel 2085 lo scenario più pessimistico prevede una riduzione dei giorni di gelo in media e alta montagna dell'ordine del 30%/40%.

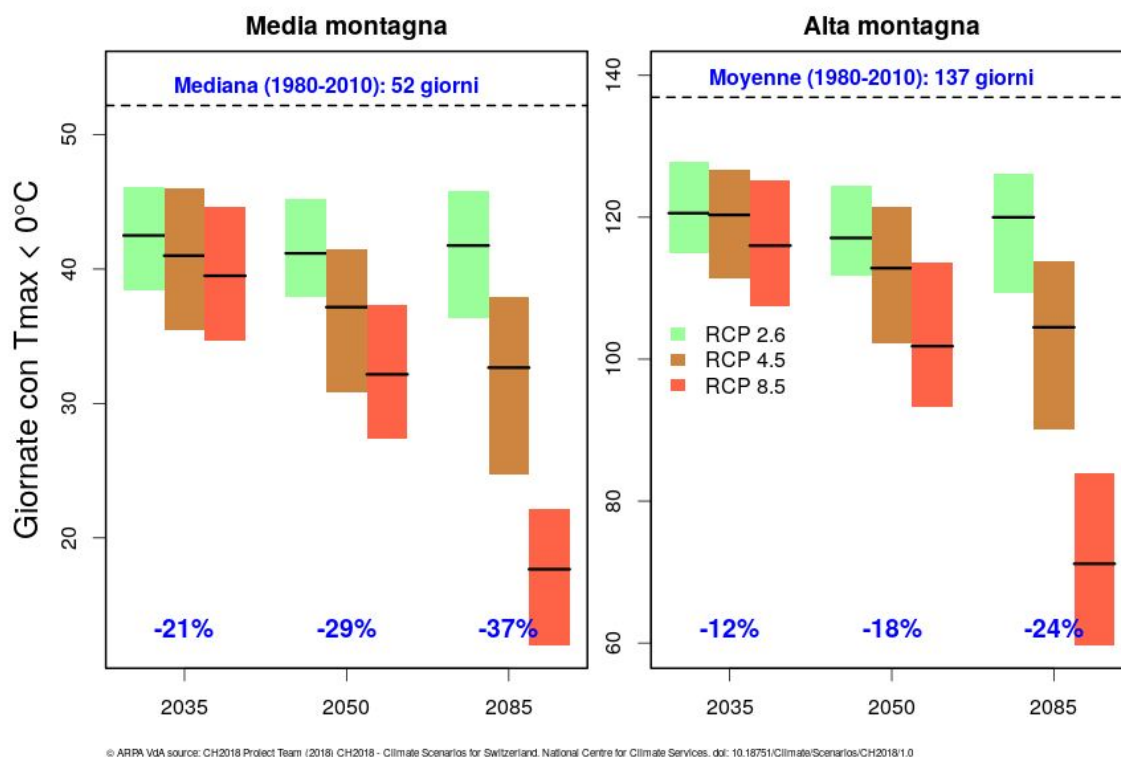


**Figure 1.13. Variazione del numero annuale di giorni di gelo per tre intervalli di altitudine.** Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati.

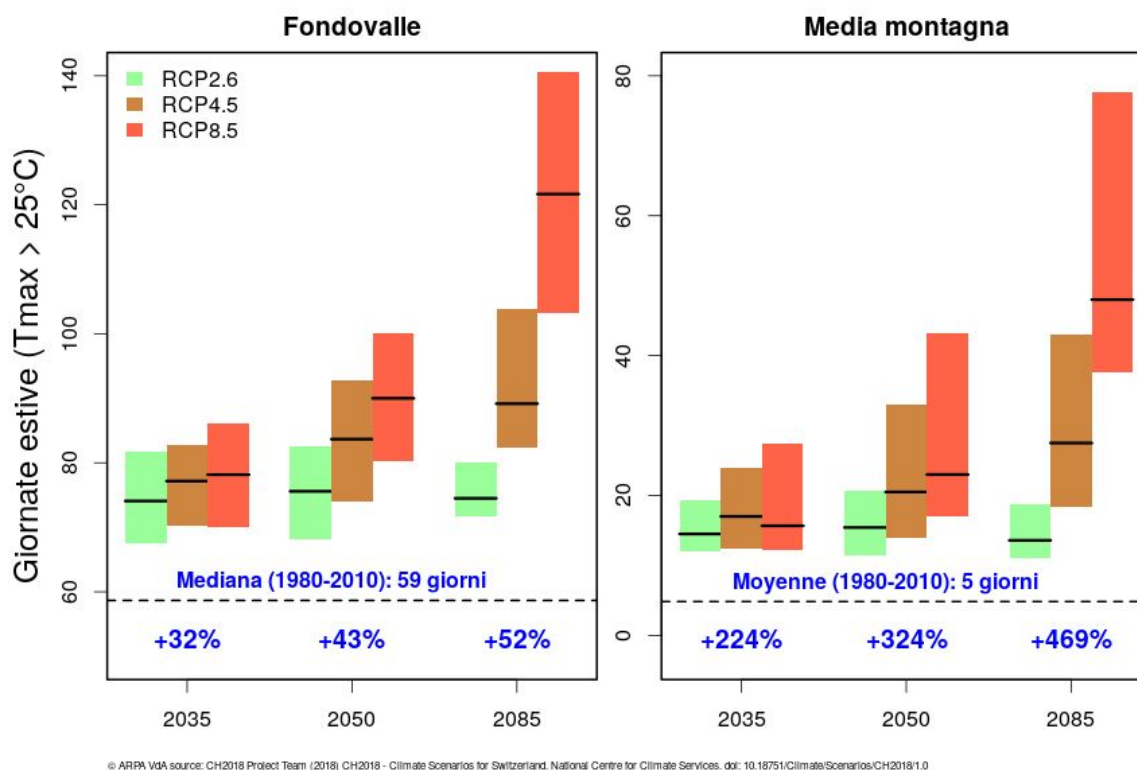
Il numero di giorni all'anno con una  $T_{max}$  (temperatura massima)  $< 0^{\circ}\text{C}$  è un secondo indicatore molto importante per gli ambienti ad alta quota, in particolare per la conservazione di permafrost, ghiacciai e neve. Nel periodo 1980-2010, tra 2300 me 2700 m, osserviamo più di quattro mesi di giorni con  $T_{max} < 0^{\circ}\text{C}$  e quasi due mesi in media montagna. In alta montagna, le giornate con  $T_{max} < 0^{\circ}\text{C}$  diminuiranno di oltre un mese nel 2050 e fino a due mesi per lo scenario pessimistico alla fine del secolo, vale a dire una riduzione del 50% rispetto al periodo attuale (Figura 1.14). Nel prossimo futuro (2035) è prevista una riduzione di circa il 15/20% sia in media che in alta montagna. Questa riduzione potrebbe avere effetti significativi sulla stabilità delle pareti rocciose e sulla dinamica dei rischi naturali e sulla pratica dell'alpinismo in generale (vedi sezione 3.6, Rischi naturali).

#### Ondate di calore

**Entro il 2035, nel fondovalle e in media montagna, sono attesi circa 20 giorni estivi aggiuntivi all'anno** (numero di giorni all'anno con temperatura massima  $> 25^{\circ}\text{C}$ , figura 1.15). In particolare, dove il numero di giorni estivi è ora di 5 giorni, si arriverà a circa 15/20 giorni dal 2035. Il numero di giorni estivi potrebbe arrivare a 3 mesi entro il 2050 in fondovalle e a un mese e mezzo in media montagna. Per fine secolo, i valori variano tra 80 e 140 giorni per i fondovalle e tra 20 e 80 giorni in media montagna.



**Figura 1.14. Variazione del numero annuale di giornate con temperatura massima <0°C per media e alta montagna.** Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati.



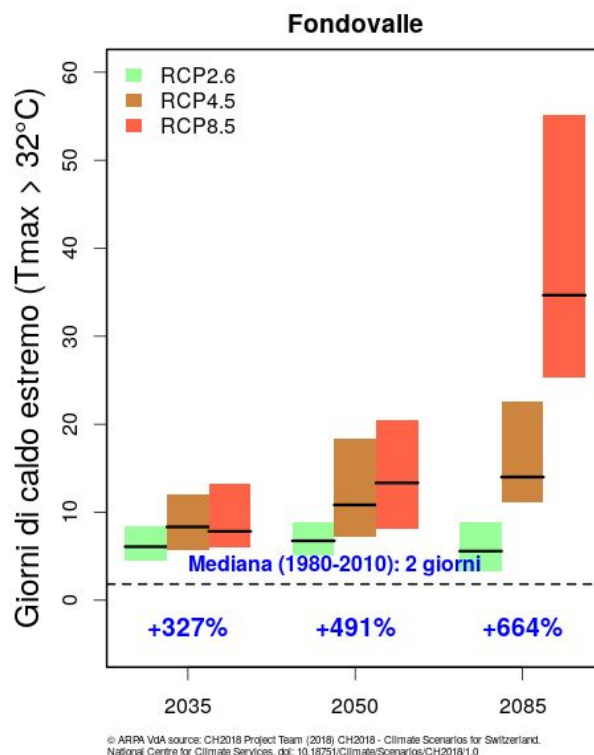
**Figura 1.15. Variazione del numero annuale di giornate estive (temperatura massima > 25°C) per fondovalle e media montagna.** Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati.



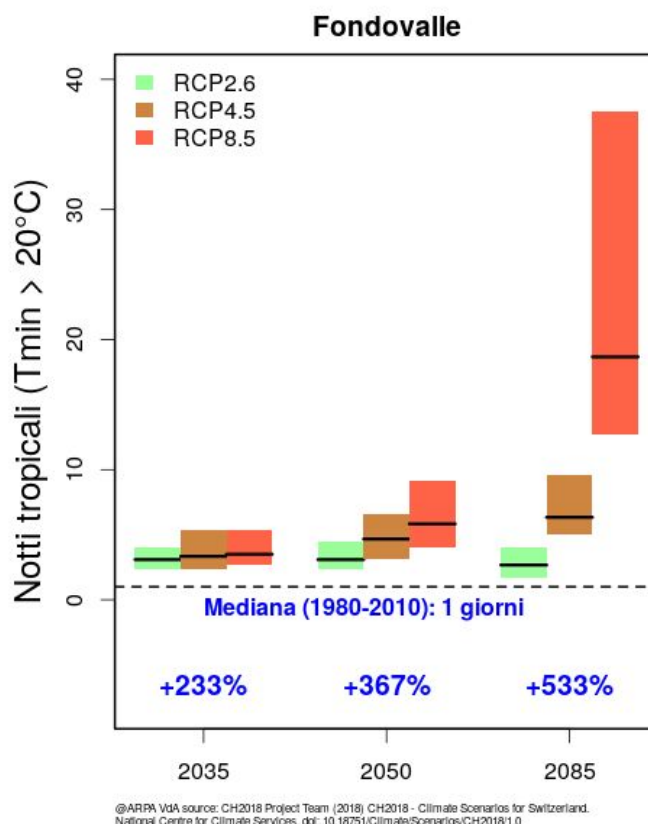
L'aumento delle giornate estive si tradurrà anche in un aumento significativo delle **giornate di caldo estremo** (numero di giorni all'anno con temperatura massima > 32°C). In fondovalle (Figura 1.16), si prevede di passare da 2 giorni di caldo estremo all'anno a 6/10 giorni nel 2035 e 15/20 nel 2050. Per la fine del secolo, l'incertezza degli scenari è molto forte e le previsioni variano tra 10 e 50 giorni.

Se durante la notte la temperatura rimane troppo alta (notti tropicali, numero di giorni all'anno con temperatura minima > 20°C) è più difficile raffreddare il corpo umano, specialmente per gli anziani o i malati. Di conseguenza, un **aumento delle notti tropicali** (Figura 1.17) può avere ripercussioni negative sulla salute e sul benessere. Entro il 2035, l'aumento previsto è limitato (meno di 5 notti) ma entro il 2050 prevediamo di avere tra le 4 e le 10 notti tropicali all'anno nei fondovalle. Alla fine del secolo, l'incertezza aumenta, ma negli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sono previsti dalle 8 alle 35 notti tropicali all'anno.

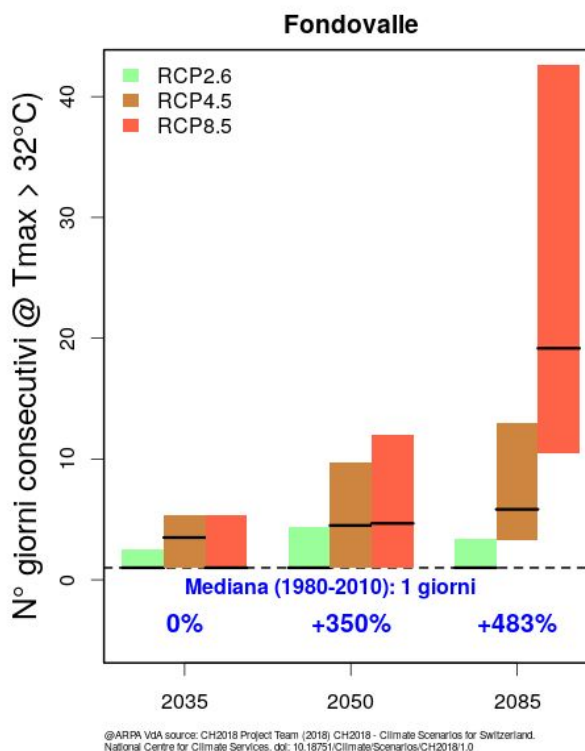
Questi indici indicano un aumento della frequenza dei giorni in cui verranno superate le diverse soglie di temperatura. È anche molto importante valutare la durata di queste ondate di calore. Entro il 2035, la durata delle ondate di calore (almeno 6 giorni consecutivi di giornate di caldo estremo) aumenterà in modo contenuto (Figura 1.18). Per il 2050, prevediamo un aumento della durata delle ondate di calore tra 5 e 10 giorni e per la fine del secolo gli scenari prevedono ondate di calore da 5 a 20 giorni. In sintesi, si prevede che **le ondate di calore diventeranno più frequenti, più intense e dureranno più a lungo**.



**Figura 1.16. Variazione del numero annuale di giorni di caldo estremo in fondovalle.** La soglia utilizzata per definire i giorni di caldo estremo (32°C) rappresenta il 95° percentile della distribuzione della temperatura massima osservata nel periodo storico 1980-2010. Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati.



**Figura 1.17. Variazione del numero annuale di notti tropicali nel fondovalle.** Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati.



**Figura 1.18. Variazione della durata delle ondate di calore.** Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati.

### Rischio siccità

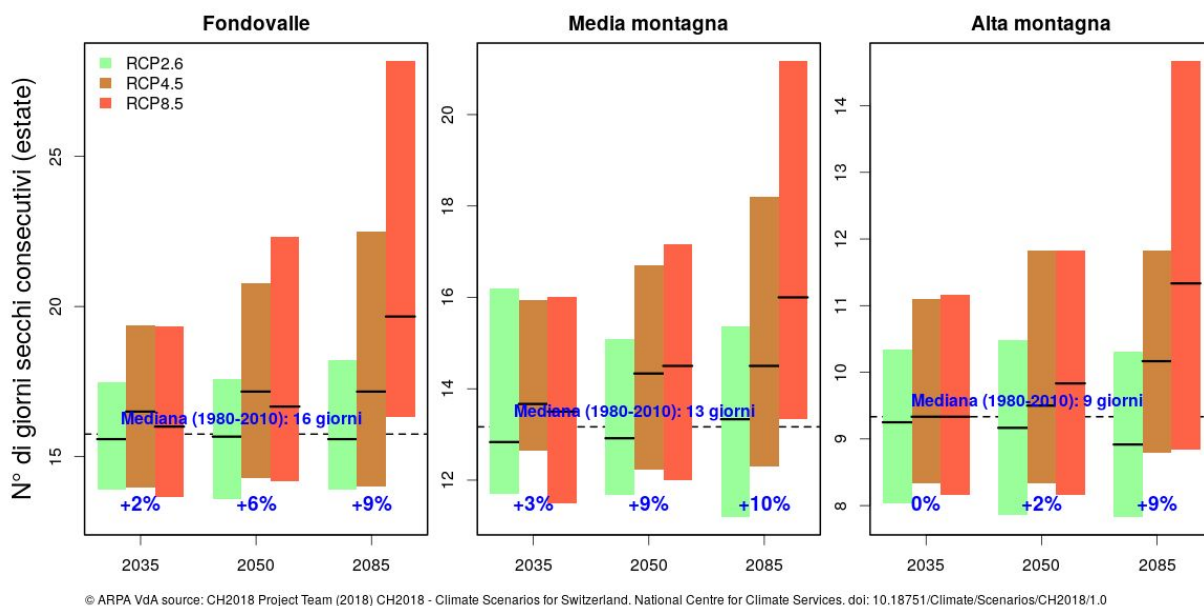
Data l'evoluzione delle precipitazioni e delle temperature, si devono attendere eventi di siccità più frequenti ed intensi nei prossimi decenni, specialmente durante l'estate e l'autunno. Gli indici utilizzati per descrivere gli scenari di siccità sono:

- **durata dei periodi secchi**, ovvero il numero di giorni consecutivi senza pioggia (numero massimo di giorni consecutivi con precipitazioni <1 mm)
- **bilancio idrico estivo** tra precipitazioni (P) ed evapotraspirazione potenziale (ETP): P-ETP. Un bilancio negativo indica una potenziale mancanza di acqua mentre un bilancio positivo indica un surplus di acqua

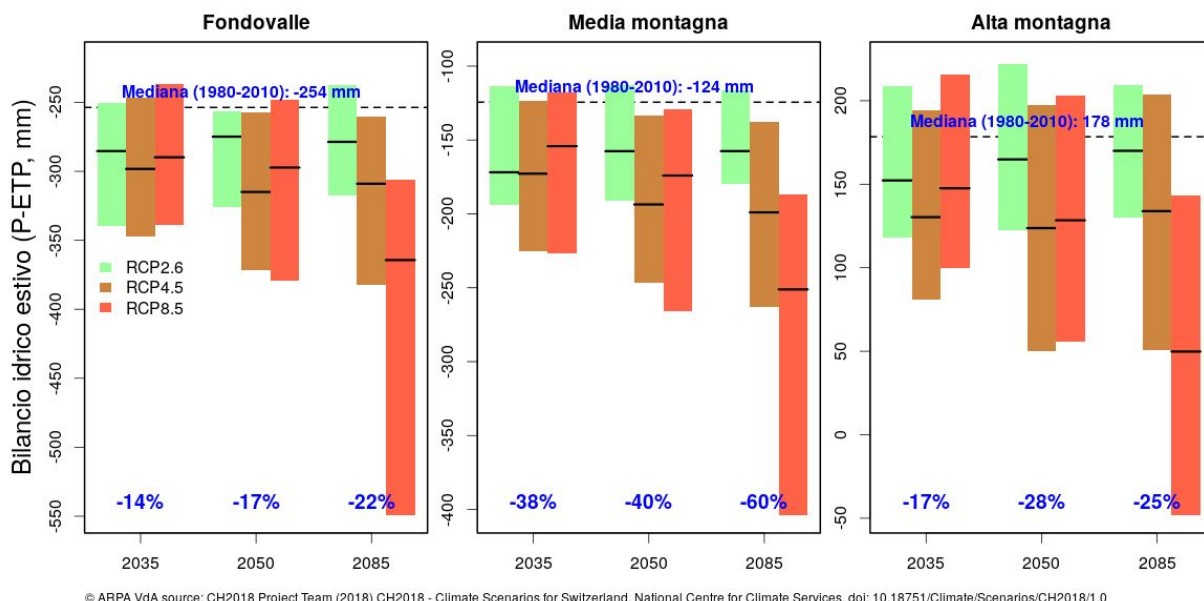
Questi indici sono caratterizzati da maggiore incertezza rispetto a quelli legati solo alla temperatura perché gli scenari di precipitazione sono più incerti rispetto agli scenari di temperatura.

Per quanto riguarda la durata dei periodi secchi, si prevede un aumento contenuto a metà secolo (2-10%) per tutte le fasce altitudinali. A fine secolo, l'evoluzione dipende fortemente dallo scenario climatico (Figura 1.19).

Considerando il bilancio idrico estivo, nel periodo 1980-2010, si osserva un bilancio negativo (P-ETP) nei fondovalle e in media montagna e positivo in alta montagna (Figura 1.20). E' attesa una riduzione significativa (-14/-38%) del bilancio idrico estivo (P-ETP) dal 2035. Questa riduzione si accentuerà ulteriormente nel 2050 (-17/-40%) e ancora di più a fine secolo (-22/-60%). L'impatto più forte è previsto in media montagna e lo scenario più pessimistico prevede un bilancio negativo anche in alta montagna a fine del secolo.



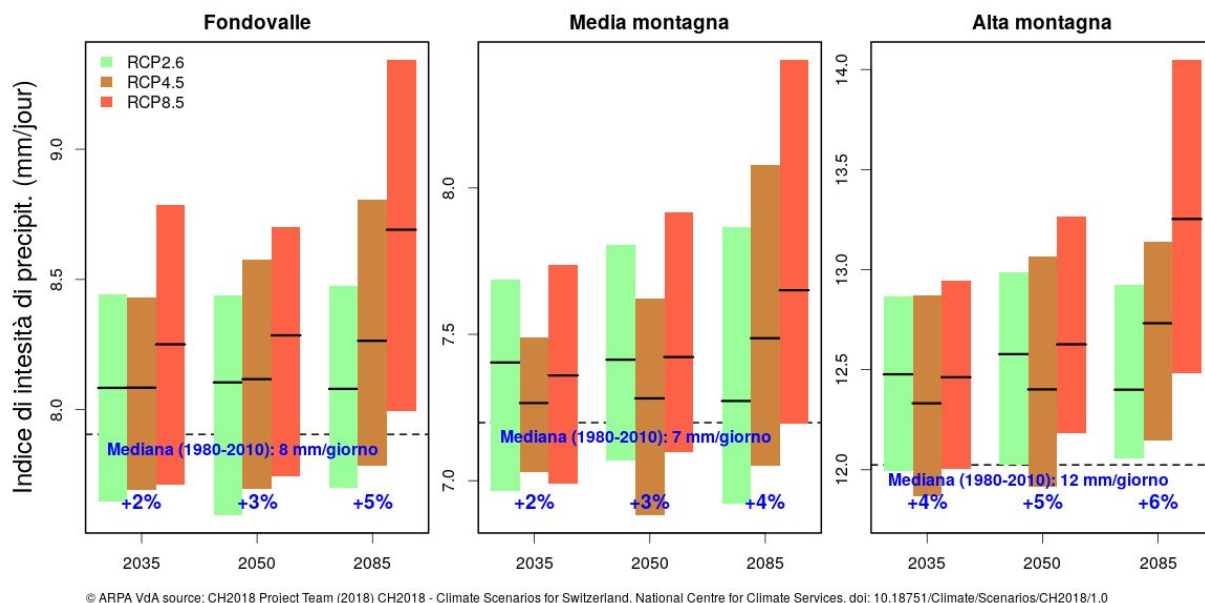
**Figure 1.19. Variazione della durata dei periodi secchi.** Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati.



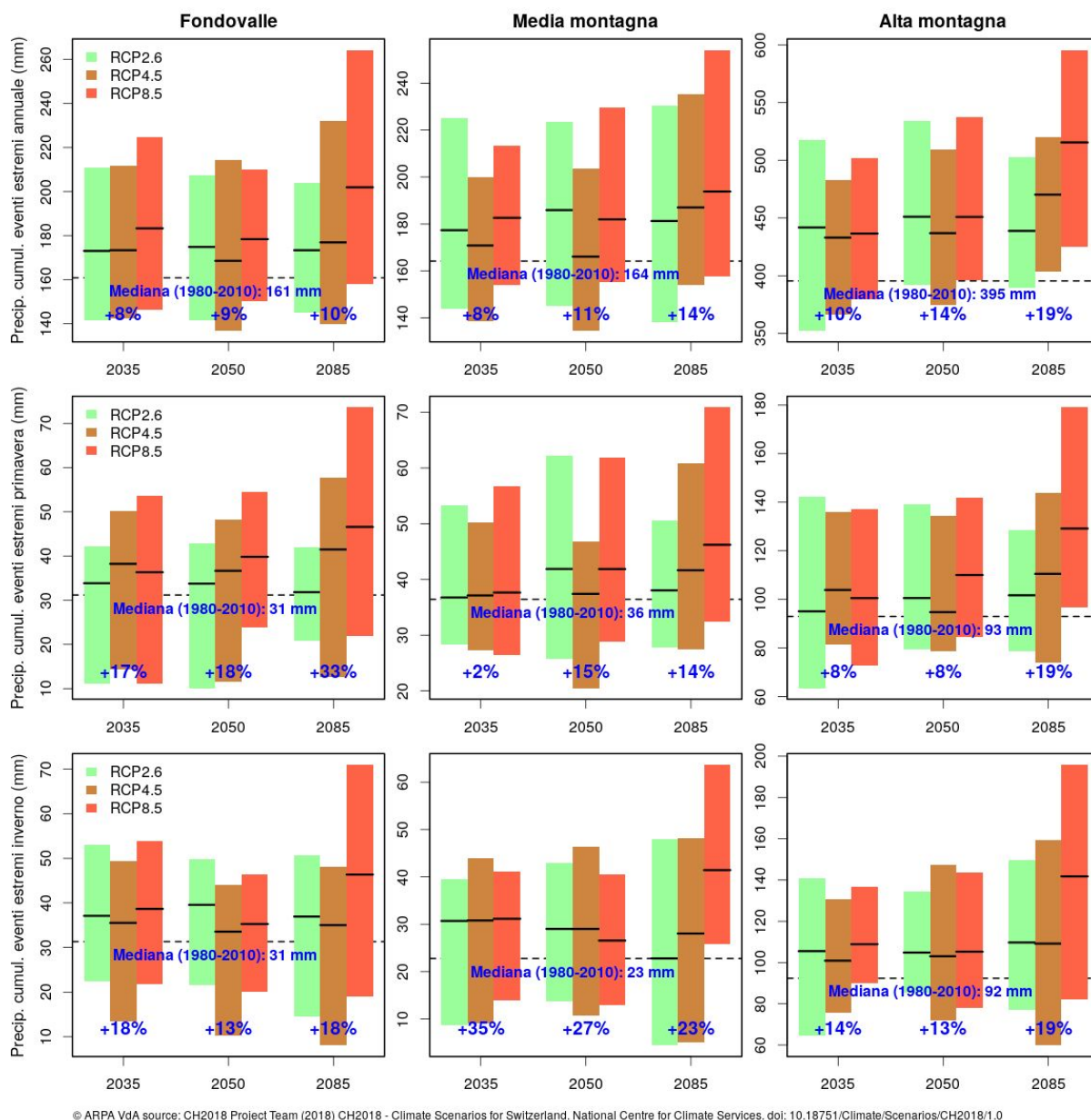
**Figure 1.20. Variazione del bilancio idrico estivo (P-ETP).** Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati.

### Precipitazioni forti

Si prevede anche un aumento dell'intensità e della frequenza delle precipitazioni in area alpina come nel resto d'Europa (Gobiet et al., 2014, CH2018). In particolare è atteso *i*) un **aumento dell'intensità delle precipitazioni** (precipitazioni cumulate (mm) nei giorni di pioggia) e *ii*) un aumento delle precipitazioni annuali cumulate in giorni di precipitazioni estreme (mm di precipitazione in giorni con precipitazione superiore a 20 mm, soglia usata per definire le precipitazioni estreme). Gli scenari climatici prevedono, a tutte le quote, un aumento del 2-8% dell'intensità media delle precipitazioni (Figura 1.21). Molto più significativo sarà invece **l'aumento della quantità di precipitazione che cadrà durante i temporali** (precipitazioni annuali cumulative in giorni di precipitazione superiore a 20 mm/giorno, definiti come giorni di precipitazioni intense): come mostrato in figura 1.22, è atteso un aumento del 8/10% dei valori totali annui già nel 2035. A metà e fine secolo sono previsti aumenti tra il 10 e il 20% con effetti più forti in alta montagna. Considerando le differenze stagionali, emerge che in primavera gli aumenti saranno più forti nel fondo valle: +17% nel 2035 e +33% a fine secolo. Incrementi tra il 2 e il 20% sono invece attesi in media e alta montagna. In inverno, l'incertezza dei modelli aumenta ma si prevede un aumento significativo già nel 2035, tra il 13 e il 35% a tutte le fasce di quota.



**Figura 1.21. Variazione dell'intensità delle precipitazioni.** Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati.



**Figura 1.22. Variazione della quantità di pioggia caduta durante le giornate di precipitazioni intense.** La soglia utilizzata per definire una giornata di precipitazione intensa (20 mm) è il 95<sup>esimo</sup> percentile della distribuzione delle precipitazioni osservate a nel periodo 1980-2010 . Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari di emissione (RCP2.6, 4.5 e 8.5). L'altezza delle barre rappresenta la variabilità dei diversi modelli climatici (10° e 90° percentile). La linea orizzontale nera al centro di ogni barra indica la mediana dei modelli. La linea nera tratteggiata indica il valore di riferimento medio nel periodo 1980-2010.

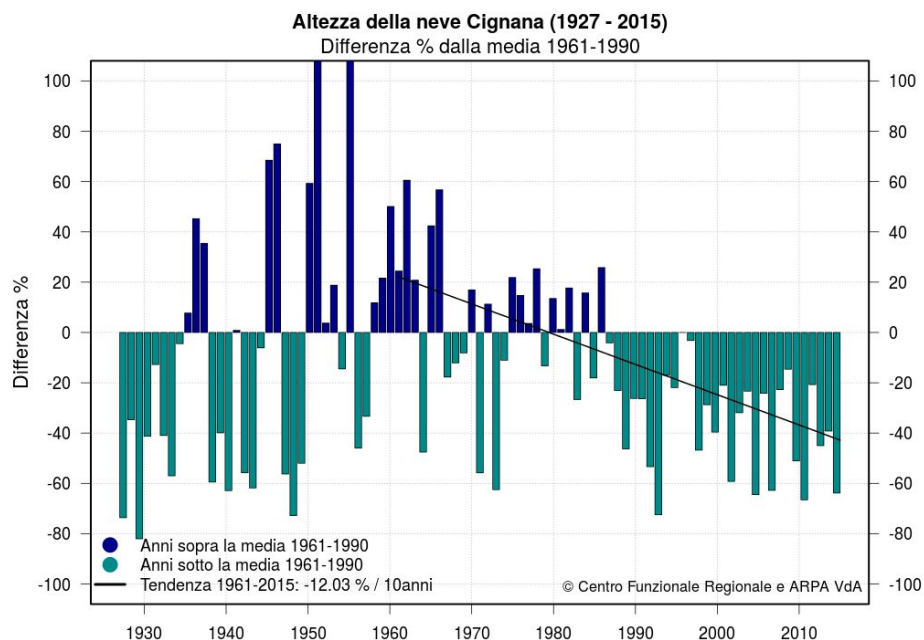
## 2. Evoluzione degli ambienti naturali

L'evoluzione di diversi parametri climatici come temperature, precipitazioni ed eventi estremi ha un impatto diretto sugli ambienti naturali del EMB. L'evoluzione di questi parametri modificherà profondamente gli ambienti ed i paesaggi del EMB, causando impatti significativi sui vari settori dell'attività umana (Figura 1.1). L'impatto sugli ambienti naturali e fisici è considerato nei paragrafi seguenti.

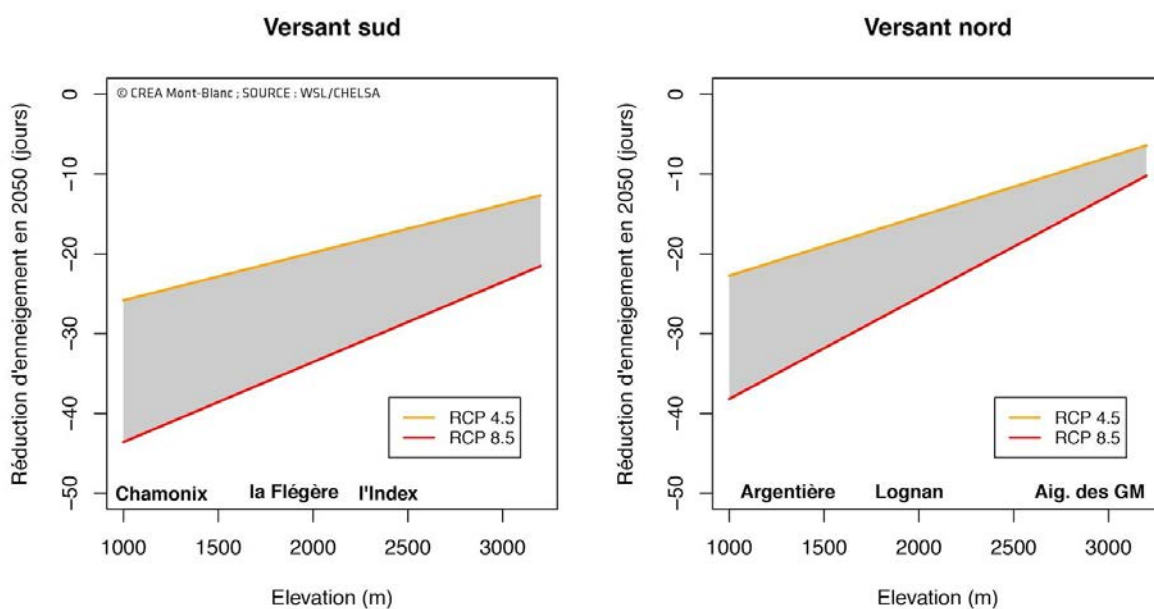
### 2.1 Riduzione dell'innevamento

La presenza di neve sul terreno, per un periodo più o meno lungo a seconda del contesto topografico (altitudine, esposizione, pendenza ...), è una delle caratteristiche principali della montagna. Modella l'ambiente grazie al suo potere isolante e fornisce una grande riserva d'acqua in primavera. L'aumento delle temperature, in inverno ma soprattutto in primavera, riduce la durata della copertura nevosa attraverso due processi principali: i) l'aumento della quota alla quale la precipitazione che cade sotto forma di neve e ii) un'accelerazione della fusione del manto nevoso in primavera ed estate in alta montagna. Dagli anni '70 nelle Alpi settentrionali, la **durata del manto nevoso tra 1100 m e 2500 m si è ridotta di 5 settimane** (Klein et al. 2016). Ad esempio, la stazione di Cignana (2150 m, Valle d'Aosta) offre una delle più lunghe serie di misurazioni della neve (1927-2018) e mostra una diminuzione di 50% dell'altezza massima della neve rispetto al periodo 1961-1990 (-12% per decade, Figura 2.1). Entro il 2050, è prevista un'ulteriore **riduzione delle nevicate**, soprattutto in media montagna e sui pendii soleggiati. Nella valle di Chamonix a 1000 m, esiste il rischio di avere da 25 a 45 giorni in meno di neve rispetto al periodo 1973-2013, a seconda dello scenario (Figura 2.2). A quote maggiori e sui versanti nord, ad esempio Grands Montets a circa 3000 m di altitudine, si prevede di perdere tra 10 e 15 giorni di innevamento nel 2050. È attesa una riduzione generale delle nevicate fino a 3000 m, ma il contesto topografico svolgerà un ruolo importante nel grado di riduzione. Queste previsioni per l'EMB sono confermate da simulazioni effettuate altrove nelle Alpi. In particolare al Col de Porte a 1500 m, la durata delle nevicate dovrebbe diminuire da 26 a 48 giorni entro il 2050 (Verfaillie et al., 2018).





**Figura 2.1. Riduzione dell'altezza della neve** presso la stazione meteorologica del lago Cignana (2150 m, Valle d'Aosta) rispetto al periodo di riferimento 1961-1990.



**Figura 2.2. Riduzione della durata del manto nevoso al 2050** sui versanti meridionali e settentrionali della valle di Chamonix.

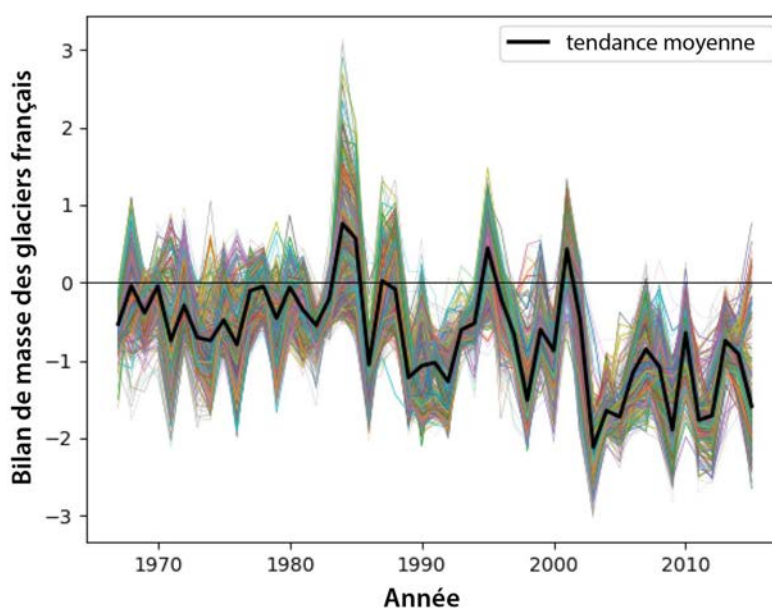


## 2.2 Ritiro dei ghiacciai



**Figura 2.3. Evoluzione del ghiacciaio Argentière (valle di Chamonix)** tra il 1890 e il 2015. © Amis du Vieux Chamonix (foto a sinistra) e CREA Mont-Blanc (foto a destra).

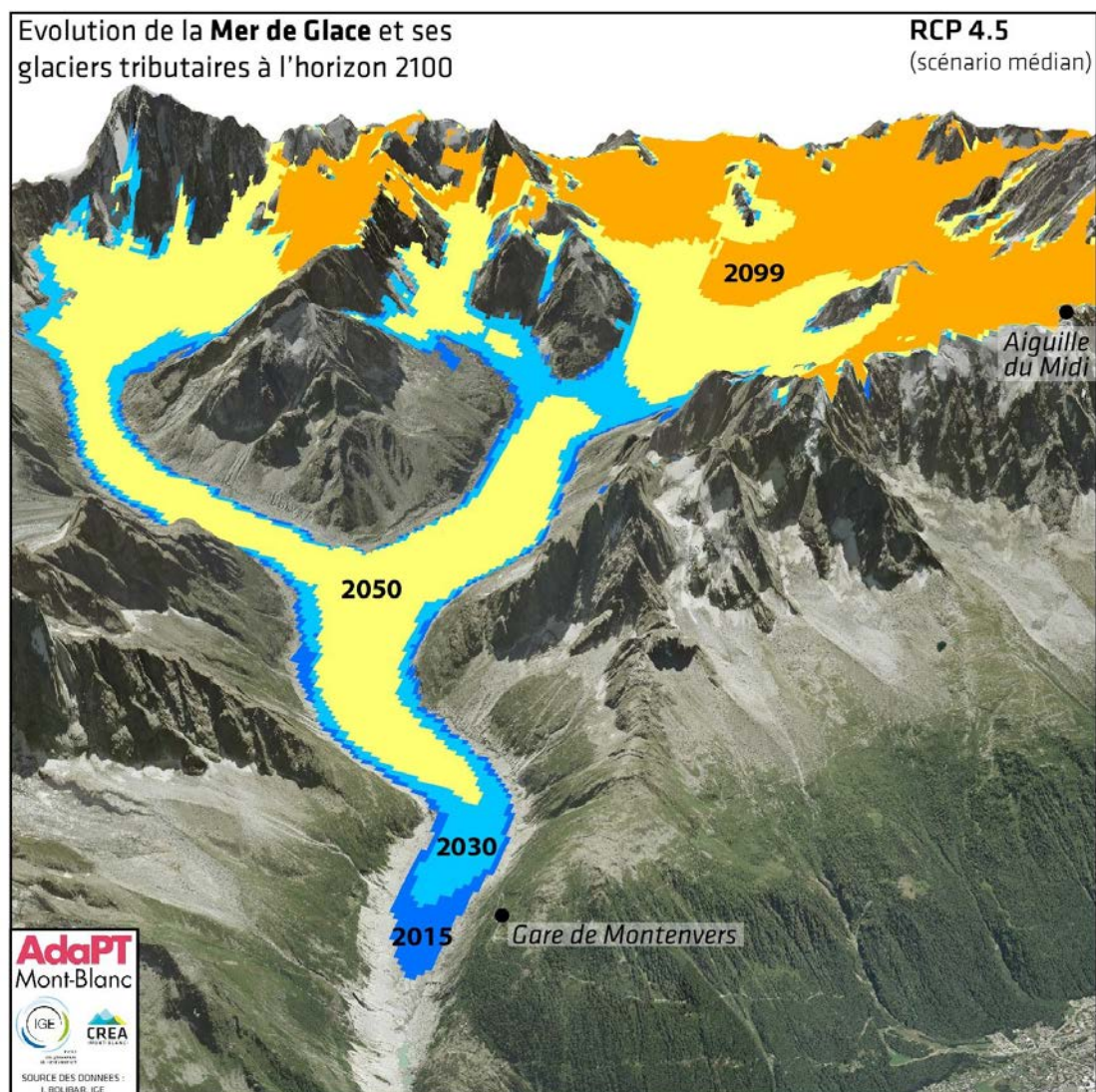
**I ghiacciai alpini hanno perso dal 30 al 40% della loro superficie e metà del loro volume dal 1850.** Nelle Alpi francesi, i ghiacciai hanno perso circa il 25% della loro area dalla fine degli anni '60 (Gardent et al., 2014 e Figura 2.4). Questa perdita è stata più accentuata nelle Alpi meridionali (-32% negli Ecrins rispetto al solo -10% nel massiccio del Mont-Blanc). Va notato che questo declino è notevolmente aumentato negli ultimi anni, come mostrato, ad esempio, dal declino di oltre 400 m della Mer de Glace dal 2003 (Vincent et al., 2014).



**Figura 2.4. Ricostruzione del bilancio di massa dei ghiacciai nelle Alpi francesi** per il periodo 1967-2015. Fonte: IGE\*/CNRS\*

In svizzera è prevista la scomparsa del 90% dei ghiacciai entro il 2090 in uno scenario climatico intermedio (CH2014-Impacts). Entro il 2050, la Mer de Glace si sarà fortemente ridotta e ritirata oltre la cresta delle Flammes de Pierre (Vincent et al., 2014; Figura 2.5). Secondo lo scenario RCP8.5, il ghiacciaio Argentière scomparirà entro il 2080 e la Mer de Glace entro la fine del secolo (Vincent et al. 2019). Nel

EMB in generale, le tendenze osservate e previste indicano chiaramente un'accelerazione della ritirata dei ghiacciai.



**Figura 2.5. Evoluzione della Mer de Glace (valle di Chamonix)** modellata nel 2030, 2050 e 2099 sulla base di dati climatici e parametri fisici del ghiacciaio. Il ritiro della fronte della Mer de Glace è anche accompagnato da una significativa riduzione del suo spessore. L'immagine di sfondo è tratta da foto aeree dell'IGN risalenti al 2008.

Il ritiro dei ghiacciai implica anche una riduzione della quantità di acqua immagazzinata sotto forma di ghiaccio che ora svolge un ruolo importante per il sistema idrologico del EMB. La Figura 2.6 mostra l'evoluzione prevista della quantità totale di acqua immagazzinata in sei ghiacciai rappresentativi (in particolare Mer de Glace e Argentière sul versante francese, Rutor e Pré de Bar in Valle d'Aosta e Trient e Corbassière in Vallese), secondo uno studio recentemente pubblicato sulle Alpi (Zekollari et. al, 2019).

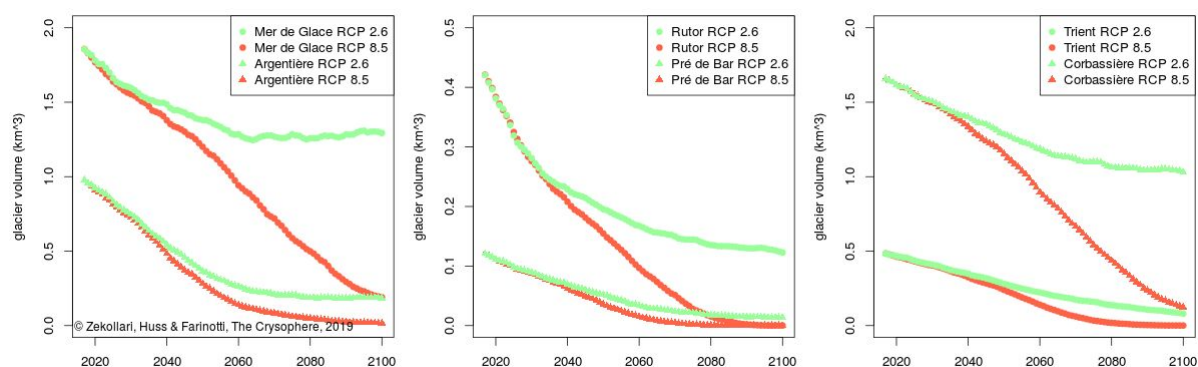


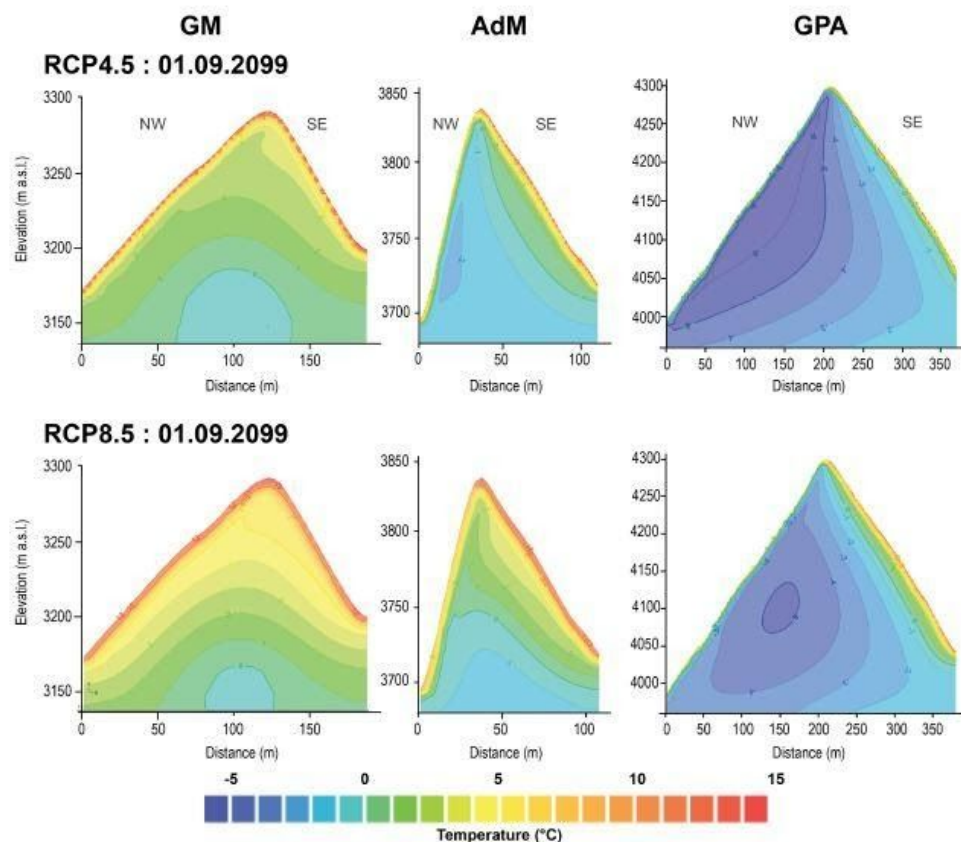
Figura 2.6. Evoluzione della quantità di acqua immagazzinata in sei ghiacciai rappresentativi del EMB. Fonte: Zekollari et al., 2019.

## 2.3 Degradazione del permafrost

Il permafrost indica qualche substrato (roccia, detrito, suolo) mantenuto permanentemente in condizioni di temperatura  $<0^{\circ}\text{C}$  e svolge un ruolo cruciale nella stabilità dei versanti e delle pareti in alta montagna. Interessa una vasta area delle pareti rocciose di alta montagna dai 2600 m sulle esposizioni nord e dai 3000 m sulle esposizioni sud (Magnin et al., 2015).

Con l'aumentare delle temperature, la degradazione del permafrost può portare ad una maggiore instabilità delle pareti rocciose. Negli ultimi 20 anni, il permafrost è quasi scomparso sulle pareti sud del massiccio del Mont-Blanc fino a 3300m e il permafrost con una temperatura superiore a  $-2^{\circ}\text{C}$  è passato da 3300m a 3850m. Entro il 2100 non dovrebbe più trovarsi sulle pareti sud al di sotto di 4.300 m e potrebbe persino sparire completamente dalle pareti sud del Mont-Blanc secondo gli scenari più critici (Magnin et al., 2017). La Figura 2.7 mostra scenari di degradazione permafrost in tre siti emblematici del massiccio del Monte Bianco. Si noti in particolare lo scenario previsto in siti come Grands Montets (GM, 3295 m) e Aiguille du Midi (AdM, 3842 m), con potenziali impatti sulle infrastrutture funiviarie (Magnin et al., 2017).





**Figura 2.7. Sezioni di temperatura delle pareti rocciose per tre siti nel massiccio del Mont-Blanc, secondo gli scenari RCP 4.5 e 8.5 (Aiguille des Grands Montets, Aiguille du Midi e Grand Pilier d'Angle) a fine secolo.** Questi diagrammi mostrano le temperature di superficie e profondità (in blu le temperature negative). E' prevista una degradazione del permafrost quasi completa a Grands Montets (GM) le cui temperature superficiali sono ampiamente superiori a 0°C in entrambi gli scenari. La temperatura dell'Aiguille du Midi (AdM) e al Grand Pilier d'Angle (GPA) dipendono fortemente dallo scenario utilizzato. Fonte: Magnin et al., 2017, EDYTEM\*/CNRS

## 2.4 Migrazione altitudinale di fauna e flora

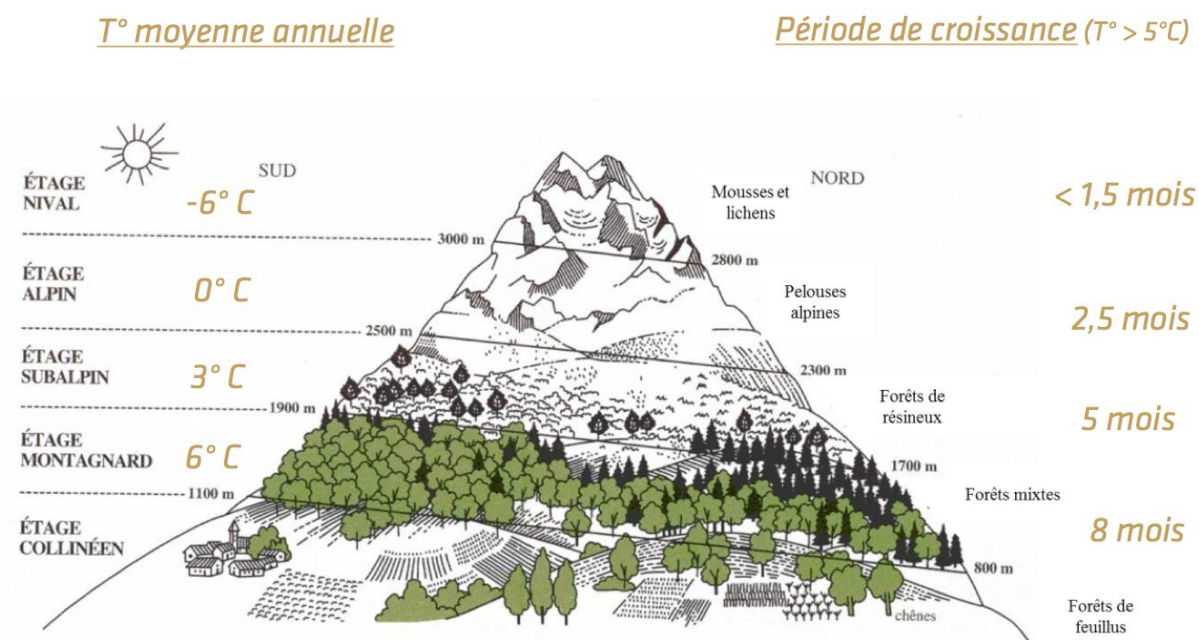
Gli ecosistemi del EMB sono costituiti da specie che reagiscono in modo diverso ai cambiamenti climatici. La presenza di una specie, vegetale (abete o larice per esempio) o animale (es stambecco, lepre di montagna) in un'area dipende anche dalle condizioni climatiche (Figura 2.8). In caso di riscaldamento, una delle strategie di adattamento più comuni è quella di salire più in alto per trovare le condizioni climatiche ideali per lo sviluppo e la vita. Tuttavia, ogni specie ha le sue caratteristiche: non tutte le specie possono migrare o migrano alla stessa velocità e non tutte reagiscono allo stesso modo a ondate di calore, siccità, riduzione delle nevicate, ecc.

Con l'aumento delle temperature, è stato osservato negli ultimi decenni una migrazione altitudinale della maggior parte delle specie, da 30 a 100 m per decennio per gli animali. Nelle piante forestali è stato osservato un aumento di circa 30 m nelle Alpi durante il XX secolo (Lenoir et al., 2008). La migrazione altitudinale, tuttavia, implica una perdita della superficie disponibile nelle aree sommitali delle montagne. In generale, le specie adattate alle condizioni più calde e provenienti da quote più basse guadagneranno terreno, probabilmente a scapito delle specie alpine adattate a condizioni più fredde. Detto questo, la fusione di nevai e ghiacciai potrebbe ritardare questa perdita offrendo nuovi spazi da colonizzare a queste specie. Un'altra potenziale opportunità per le piante alpine è rappresentata

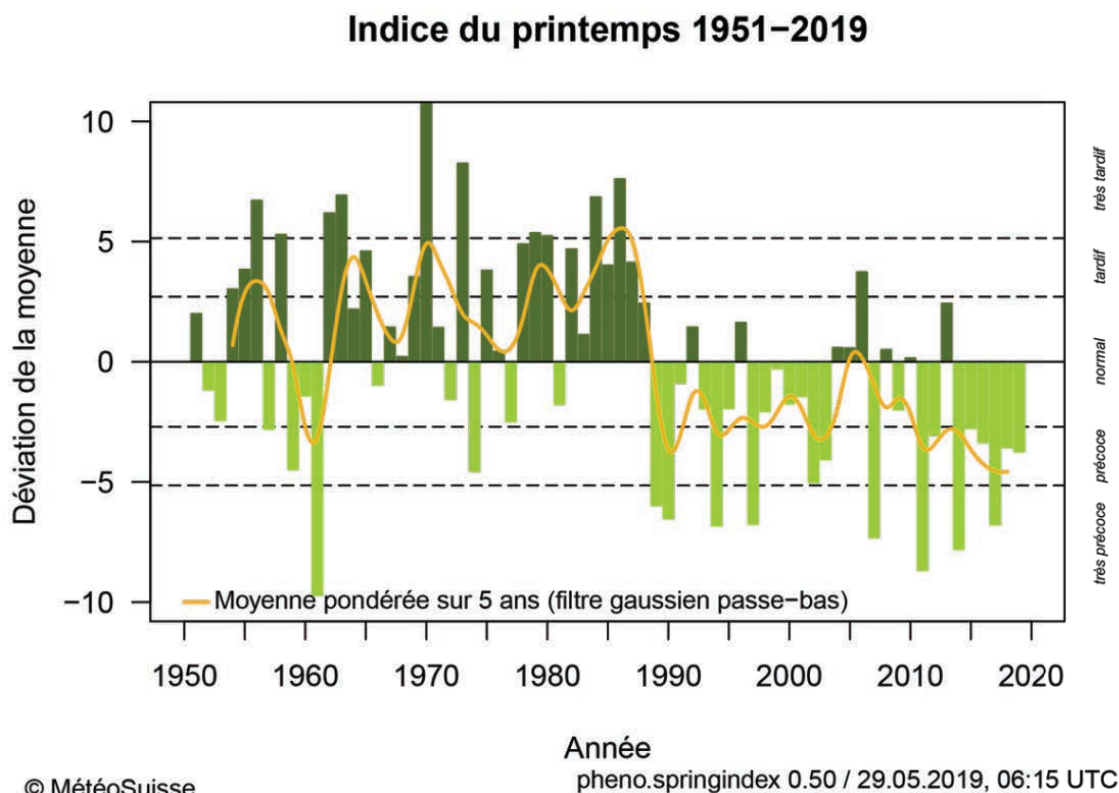
dall'eterogeneità topografica delle montagne. Ciò offre una grande varietà di condizioni termiche e di neve a piccola scala (a volte a pochi metri di distanza), creando "micro-rifugi" che consentono alle piante alpine di trovare condizioni favorevoli (Scherrer e Körner 2011). Questi micro-habitat possono fungere da zone cuscinetto che limiteranno la perdita di biodiversità nei decenni a venire.

## 2.5 Anticipo della primavera e allungamento della stagione vegetativa

Oltre alla migrazione altitudinale, le specie hanno un'altra strategia di adattamento: cambiare la loro fisiologia o il loro comportamento stagionale per adattarsi alle nuove condizioni nel loro ambiente attuale. **Esiste già una tendenza generale verso l'anticipo di eventi stagionali come la fioritura, la riproduzione o la migrazione, da 2 a 5 giorni al decennio per piante e animali terrestri negli ultimi 50 anni.** Ad esempio, l'arrivo degli uccelli migratori è avanzato di circa 15 giorni in 30 anni e la deposizione di uova degli anfibi come il rospo comune è sempre più precoce (un mese prima di 25 anni fa in un sito monitorato a 1850m in Svizzera; Vittoz et al., 2013).

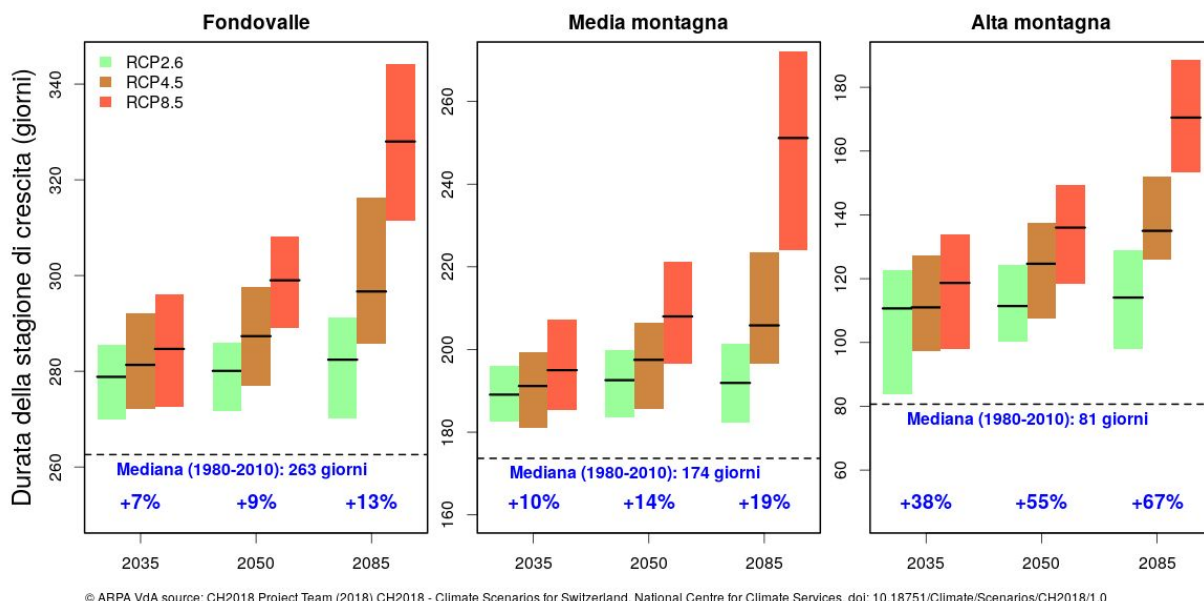


**Figura 2.8. Condizioni climatiche e periodo favorevole allo sviluppo della vegetazione in funzione dell'altitudine.** Le temperature a sinistra indicano la temperatura media annuale per altitudine. Per gli alberi, ad esempio, è necessaria una temperatura media superiore a 5°C affinché la fotosintesi, e quindi la crescita, abbia luogo. Maggiore è l'altitudine, minore è il numero di giorni all'anno con temperatura superiore a 5°C; è la durata di questo periodo, chiamato "stagione vegetativa", che è rappresentato a destra. Per crescere, gli alberi più veloci hanno bisogno di una stagione di crescita di almeno tre mesi (Paulsen e Körner, 2014). Con l'aumento delle temperature primaverili e autunnali, questa durata aumenta, il che consente agli alberi e agli arbusti di migrare a quote maggiori.



**Figura 2.9 L'evoluzione della data di sviluppo delle gemme fogliari in Svizzera dal 1951.** © MeteoSuisse

Per la vegetazione, l'aumento delle temperature primaverili unito all'anticipo della fusione nivale consente alla maggior parte delle specie vegetali, uno sviluppo precoce (Figura 2.9). Di conseguenza, la stagione di crescita delle piante alpine può allungarsi e la produttività, generalmente limitata dalle temperature fredde e dalla copertura nevosa, può aumentare. La durata attuale della stagione di crescita è da due a quattro settimane più lunga di quella degli anni '60 (CH2018). Gli scenari climatici prevedono un ulteriore significativo aumento della durata della stagione di crescita. Questo aumento (Figura 2.10) sarà già significativo nel 2035 (7/38%) e avrà un impatto ancora maggiore sugli ecosistemi di alta montagna. Sono quindi attesi diversi cambiamenti nella composizione delle comunità vegetali nei prossimi anni, in connessione con una stagione di crescita più lunga: i) il limite della foresta salirà di quota ii) una progressiva colonizzazione da parte delle brughiere (mirtilli, rosso, ginepro o rododendro) e specie arboree (ontano verde e salici) delle praterie alpine e iii) la salita e la densificazione delle praterie alpine nelle zone ghiaiose o nei margini glaciali. Oltre a questo impatto sulla distribuzione e composizione dei diversi ecosistemi, l'aumento della lunghezza della vegetazione avrà anche un effetto molto significativo sulla produttività di questi ecosistemi, in termini di bilancio annuale di CO<sub>2</sub> e di interazione con i cicli dei nutrienti e dell'acqua e con i processi geomorfologici.



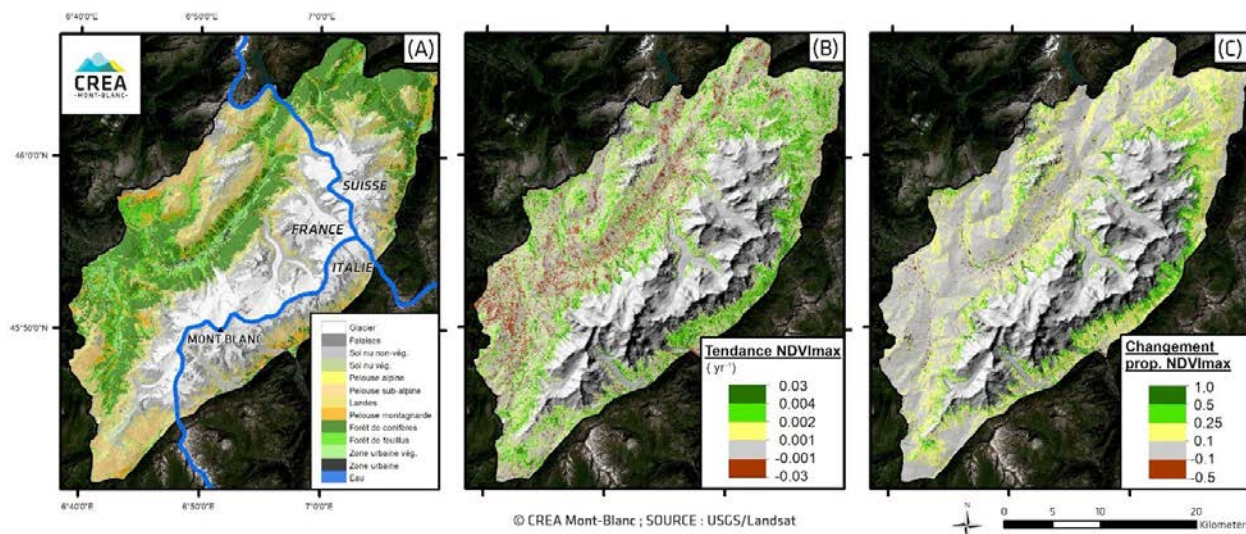
**Figure 2.10. Variazione della durata della stagione di crescita** definita come l'intervallo tra il primo periodo caldo dell'anno quando la temperatura è  $> 5^{\circ}\text{C}$  per 6 giorni consecutivi e il primo periodo freddo quando la temperatura scende sotto  $5^{\circ}\text{C}$  per 6 giorni consecutivi tra luglio e dicembre. Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati.

Tuttavia, per alcune specie, l'aumento della stagione di crescita può non rappresentare un effetto positivo. Per i mirtilli, ad esempio, che sono molto sensibili al gelo, o altre specie come il salice, lo sviluppo primaverile anticipato aumenta il rischio di danni associati a gelate tardive più frequenti in primavera (Wheeler et al., 2014). Allo stesso modo, per i grandi erbivori come lo stambecco la stagione delle nascite non dipende dalle condizioni climatiche primaverili ma piuttosto dalle date di accoppiamento (autunno-inverno) che tendono a cambiare poco. In caso di un anticipo dello sviluppo vegetale primaverile ciò si traduce in un mismatch tra il picco di disponibilità della vegetazione e le necessità alimentari dei piccoli di stambecco. Poiché tutte le specie non rispondono allo stesso modo ai cambiamenti climatici, ciò comporta potenziali rischi di desincronizzazione tra le specie all'interno dell'ecosistema. In futuro è quindi prevedibile un grande cambiamento nei servizi ecosistemici in alta montagna. Saranno necessari studi specifici su questo argomento per anticipare le conseguenze di questi fenomeni al fine di gestire i rischi e le opportunità. In ogni caso, è necessario specificare che questi scenari, in particolare la durata della stagione di crescita, si basano solo sulla temperatura dell'aria e non tengono conto della durata della copertura nevosa o della siccità estiva.

## 2.6 Variazione nella distribuzione delle specie

La migrazione altitudinale, combinata ad un allungamento della stagione vegetativa, contribuisce ad un "rinverdimento" delle Alpi (Carlson et al.2017; Steinbauer et al.2018). Le analisi condotte confermano questa tendenza anche sul massiccio del Monte Bianco, dove si registra un marcato aumento dell'area occupata dalla vegetazione tra i 2.500 e i 3.000 m tra il 1984 e il 2017 (Figura 2.11). **In risposta all'aumento di temperatura e alla liberazione di nuove aree colonizzabili a seguito della scomparsa di ghiacciai e nevai, è attesa una trasformazione dei paesaggi di alta montagna del massiccio del Monte Bianco, verso ambienti sempre più vegetati.**





**Figura 2.11. Evoluzione della produttività delle piante (NDVImax) tra il 1984 e il 2017 nel massiccio del Monte Bianco**, sulla base di un'analisi di immagini satellitari Landsat. A sinistra (A) è indicata la posizione dei vari ambienti naturali (Fonte: J. Renaud, LECA); La mappa B mostra le tendenze lineari della produttività degli ecosistemi tra il 1984 e il 2017 e la mappa C mostra le variazioni proporzionali delle variazioni di produttività nello stesso periodo. Le aree verde scuro indicano un aumento significativo della copertura vegetale, molto spesso a seguito della scomparsa di nevai e ghiacciai.

Negli animali, in particolare quelli che non regolano la temperatura corporea (parassiti, insetti, anfibi, rettili), le variazioni di temperatura hanno un impatto diretto sulla loro fisiologia e capacità riproduttiva. Questo è il caso, ad esempio, degli scolitidi, piccoli insetti che parassitano specie arboree comuni come l'abete rosso nutrendosi di legno tenero che possono causare la morte dell'albero. Questi parassiti, come molti altri (specialmente nelle aree agricole) si sviluppano molto più rapidamente con l'innalzamento delle temperature e minacciano di realizzare generazioni aggiuntive durante la stagione estiva (CH2014-Impacts, Jakoby et al., 2019). La proliferazione di alcune specie indebolisce altre, provocando profondi cambiamenti nell'ecosistema. L'abete rosso oggi dominante sui versanti nord del EMB è, ad esempio, molto vulnerabile ai parassiti e alla siccità estiva. Le potenziali opportunità offerte dai cambiamenti climatici (es. allungamento stagione vegetativa e colonizzazione di aree a quota maggiore) possono essere vanificate da queste vulnerabilità. Inoltre alcune specie simboliche delle Alpi, come ad esempio gli specialisti di ambienti freddi e innevati noti come "artico-alpini", potrebbero essere minacciate direttamente dai cambiamenti climatici. Nello scenario pessimistico, la pernice bianca rischia, ad esempio, di perdere circa il 60% del suo habitat entro il 2050 e oltre il 90% entro il 2090.



### 3. Impatti sui settori socio-economici

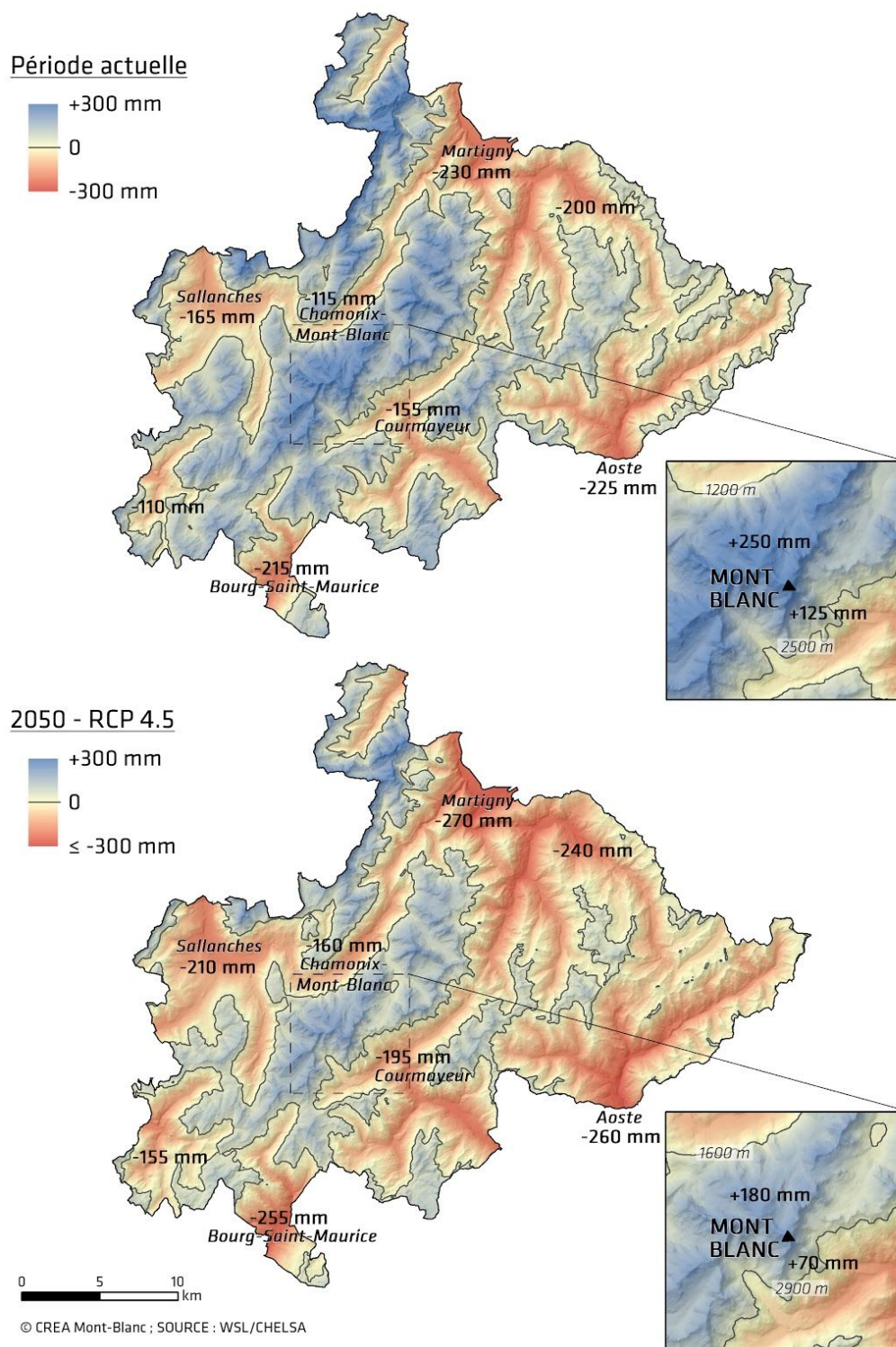
Tra i numerosi settori socio-economici che saranno influenzati dai cambiamenti climatici a livello del EMB, i settori prioritari definiti durante le attività partecipative del progetto Adapt Mont-Blanc sono le **risorse naturali**, il **turismo** e i **rischi naturali**. L'obiettivo principale dell'approccio partecipativo, che ha coinvolto amministratori locali dei tre paesi, ONG, tecnici delle amministrazioni regionali e cantonali, professionisti e le varie parti interessate, è stata la definizione dei settori considerati prioritari dai territori del EMB e che avrebbero dovuto essere approfonditi in termini di impatti. Le seguenti sezioni del rapporto presentano una prima analisi di questi impatti, basata sia sullo sviluppo di indicatori specifici realizzati nell'ambito di questo progetto sia su un'analisi bibliografica. Questa analisi non è quindi esaustiva, apre le porte a specifici studi aggiuntivi su alcuni punti, ma offre già elementi solidi, coerenti e multisettoriali per sostenere lo sviluppo di piani di adattamento ai cambiamenti climatici a livello del Espace Mont-Blanc.

#### 3.1 Risorse idriche

L'acqua rappresenta una risorsa naturale fondamentale per la vita. I cambiamenti climatici stanno già influenzando il ciclo dell'acqua in montagna. L'aumento delle temperature associato ad una ridistribuzione stagionale delle precipitazioni (cfr. 1.3), la riduzione del manto nevoso (cfr. 2.1) e la fusione dei ghiacciai (cfr. 2.2) avranno un impatto sulla disponibilità di acqua.

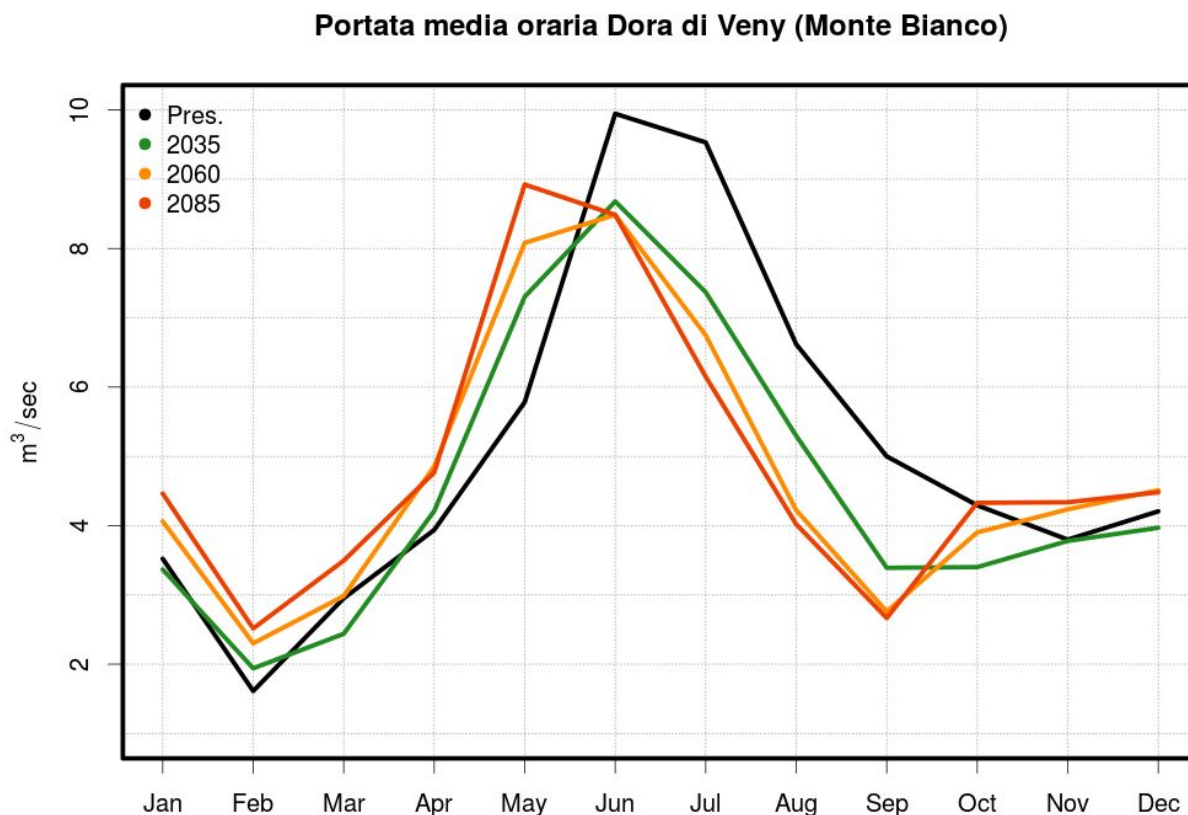
Sono attese siccità estive più frequenti ed un maggior deficit idrico del suolo, condizioni che inducono stress idrico per la vegetazione durante il periodo di crescita (Figura 1.20). I modelli prevedono una risalita in quota (da 600 a 900 m) delle aree caratterizzate da un bilancio idrico estivo negativo (P-ETP, Figura 3.1). Nello scenario mediano (RCP 4.5), il deficit idrico si intensificherà con una diminuzione di circa 40/60 mm di acqua su tutto il territorio. Questo fattore potrà causare stress idrico non solo sulle colture del fondovalle, ma anche nei pascoli di media e alta montagna. È importante notare che tali stime si basano solo sulle precipitazioni e sulla evapotraspirazione estiva, omettendo il ruolo dell'approvvigionamento idrico del manto nevoso o delle proprietà del suolo.

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



**Figura 3.1. Bilancio idrico estivo (P-ETP)** del periodo attuale e nel 2050. Un valore di 0 rappresenta un equilibrio tra l'acqua che arriva sotto forma di precipitazione e l'acqua che esce sotto forma di evapotraspirazione; valori positivi indicano precipitazioni in eccesso mentre valori negativi indicano deficit idrico.

Per quanto riguarda l'idrologia, la Figura 3.2 mostra gli scenari di evoluzione della portata di un torrente sul versante italiano del EMB (Dora di Vény, Courmayeur, Valle d'Aosta), ottenuto con un modello idrologico che tiene conto delle dinamiche glaciali e nivali. L'aumento delle temperature invernali e primaverili porterà ad una diminuzione delle precipitazioni sotto forma di neve e quindi un aumento del deflusso idrico a fine inverno e inizio primavera. Al contrario, la riduzione delle precipitazioni in estate comporterà una diminuzione delle portate estive.



© Centro Funzionale Regionale, CIMA Foundation et ARPA VdA

**Figura 3.2. Modifica del regime idrologico della Dora di Vény, Courmayeur, Valle d'Aosta).** Le simulazioni si basano su tre scenari di emissione combinati (RCP 2.6, 4.5, 8.5), un modello climatico (EC-EARTH-RCA4) e un modello idrologico che tiene conto delle dinamiche glaciali e nivali. Fonte: Fondazione CIMA e Centro Funzionale Regione Valle d'Aosta.

Queste modifiche possono da una parte avere effetti sul rischio di alluvioni (vedi 3.6), mentre periodi di siccità estivi potranno causare conflitti per i diversi usi della risorsa idrica: umani, agricoli, idroelettrici e deflussi riservati agli ecosistemi a valle. Per prevenire meglio questi potenziali conflitti, saranno necessari studi specifici a livello di corso d'acqua o di bacini, una ridefinizione dei diritti d'uso, lo sviluppo di una cultura del co-uso dell'acqua, l'ottimizzazione delle tecniche di irrigazione e, se necessario, anche la creazione di serbatoi di stoccaggio in quota, che potranno compensare la perdita della superficie glaciale e servire a regolare i flussi nel tempo.

### 3.2 Agricoltura

L'agricoltura è uno dei settori economici che potrebbe essere maggiormente influenzato dai cambiamenti climatici: l'aumento delle temperature e la variazione nella distribuzione della precipitazione avranno impatti molto forti sulla produttività vegetale e sulla distribuzione e la diffusione di agenti patogeni. Complessivamente, questi effetti potrebbero portare ad un cambiamento nella produttività di alcune colture. Le analisi di impatto a livello europeo e regionale hanno messo in luce sia opportunità di una maggiore produttività per alcune colture e/o pascoli sia rischi legati alla variabilità delle precipitazioni e all'aumento di eventi estremi. A livello di Espace Mont Blanc, le attività agricole più importanti sono la coltivazione di alberi da frutto e viti in Valle d'Aosta e in Vallese e l'allevamento.

Per quanto riguarda la produzione di foraggio, con una stagione invernale ridotta (Figura 2.2) e a seguito dell'aumento delle temperature potrebbe verificarsi un aumento della produttività dei pascoli del 5/15% (Sérès, 2010) tale da consentire un aumento del numero di tagli (Chaix et al., 2017, Figura 2.10). Vari agricoltori della Valle d'Aosta, durante l'incontro transfrontaliero a Chamonix nel novembre del 2018, hanno testimoniato il verificarsi sempre più frequente di un terzo taglio fino a circa 1500 m di quota a fine stagione. Tali opportunità potrebbero essere limitate in caso di episodi di siccità che possono causare una riduzione della produzione primaria o persino un degrado della copertura vegetale (Cremonese et al., 2017).

In questo rapporto vengono presentati quattro casi studio relativi alle attività agricole più significative a livello del Espace Mont Blanc. In particolare, abbiamo sviluppato scenari per la modifica dei **cicli dei patogeni**, un'analisi delle condizioni ottimali per la **viticoltura**, una proiezione del **rischio di gelate tardive** e abbiamo calcolato un indice correlato allo **stress termico per le vacche da latte**.

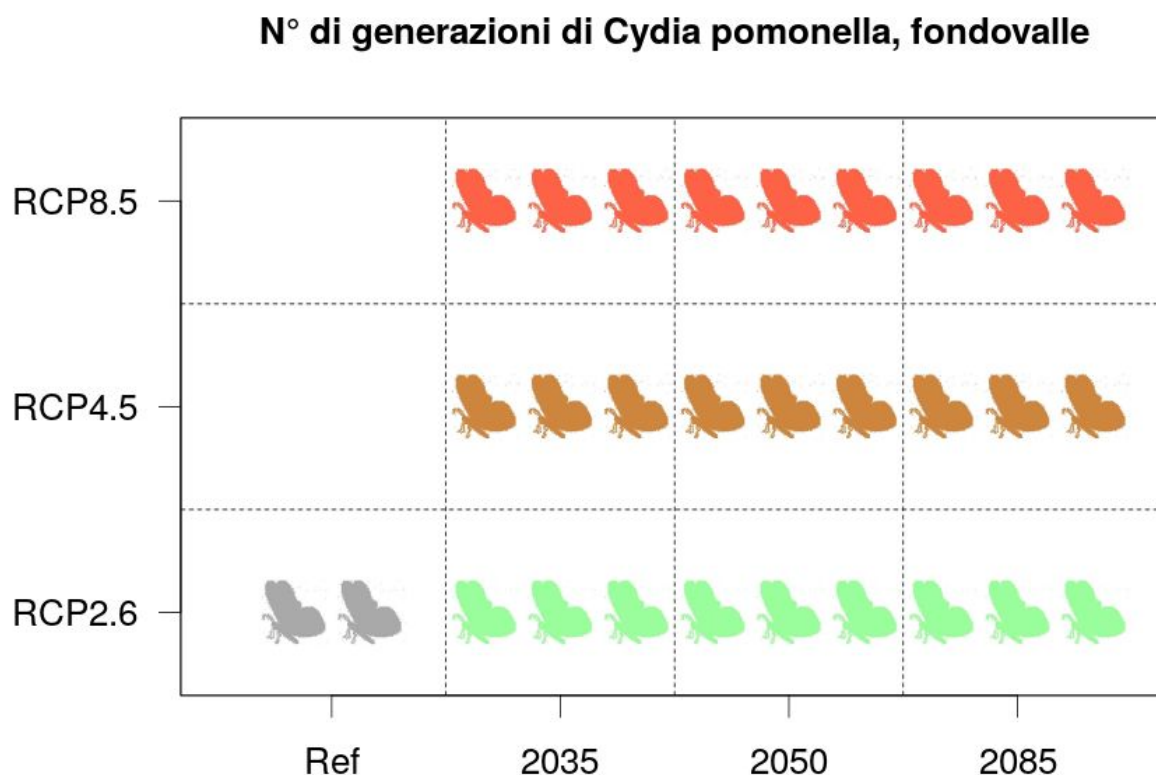
#### *Cicli dei patogeni*

I parassiti degli alberi da frutto e delle colture potranno essere favoriti dall'aumento delle temperature per diffondersi e riprodursi più rapidamente, causando danni significativi. Gli impatti che gli insetti fitofagi possono avere saranno principalmente collegati ai seguenti processi:

- variazioni del numero di generazioni per stagione (specie potenzialmente interessate: *Lobesia botrana*, *Empoasca vitis*, *Planococcus ficus*, *Tuta absoluta*, *Cydia pomonella*, ...)
- variazione della distribuzione geografica con una più ampia distribuzione in quota o arrivo di nuove specie (specie potenzialmente interessate: *Lobesia botrana*, *Eupoecilia ambiguella*, *Scaphoideus titanus*, *Thaumetopoea pityocampa*, *Leptinotarsa decemlineata*, ...)
- modifica della fase di svernamento e anticipo della prima generazione (specie potenzialmente interessate: *Drosophila suzukii*, *Cacopsylla pyri*, *Cacopsylla melanoneura*, ...)
- diffusione di specie invasive (specie potenzialmente interessate: *Halyomorpha halys*, *Popillia japonica*, *Tuta absoluta*, *Harmonia axyridis*, ...)

Stime dell'evoluzione dei cicli di vita di alcuni patogeni sono stati sviluppati utilizzando modelli fenologici specifici (pacchetto devRate R, Rebaudo et al., 2017) basati sui diversi scenari climatici. La scelta dei patogeni prioritari è stata fatta in collaborazione con i ricercatori del Istitut Agricole Régional della Valle d'Aosta (IAR, [www.iaraosta.it](http://www.iaraosta.it)).

La Figura 3.3 mostra che l'aumento delle temperature porterà alla realizzazione di tre generazioni all'anno di **carpocapsa** (*Cydia pomonella*), uno dei principali parassiti di meli e peri, già nel 2035. La terza generazione rappresenta un rischio importante per le varietà tardive. La scelta delle varietà sarà quindi un importante strumento di adattamento (Centro nazionale svizzero per i servizi climatici)



**Figura 3.3. Variazione del numero di generazioni di *Cydia pomonella* nel fondovalle.**

La Figura 3.4 mostra la stessa analisi per la **tigioletta della vite (*Lobesia botrana*)** uno dei principali parassiti della vite che mediamente realizza tre generazioni all'anno nel periodo 1980-2010. Con temperature maggiori, già nel 2035, si avrà il rischio di una quarta generazione e potenzialmente anche di una quinta a partire da metà secolo. Questi risultati implicano importanti effetti sulla viticoltura, se si considera che tra gli effetti della tigioletta vi è anche la predisposizione di condizioni favorevoli per ulteriori attacchi di parassiti come *Botrytis cinerea*. In conclusione è atteso un aumento significativo dei danni causati dalla tigioletta della vite.

La Figura 3.5 mostra gli scenari di evoluzione del numero di generazioni di *Tuta absoluta*, un parassita originario del Sud America, che è apparso in Europa dopo gli anni 2000 e che colpisce principalmente l'orticoltura: si sviluppa su pomodoro, patate, melanzane, melone pera o pepino e peperoni. Questa farfalla può generare perdite fino all'80-100% delle rese. E' prevista una generazione aggiuntiva (da cinque a sei) al 2035 e fino a otto generazioni sono previste entro la fine del secolo secondo lo scenario RCP8.5.



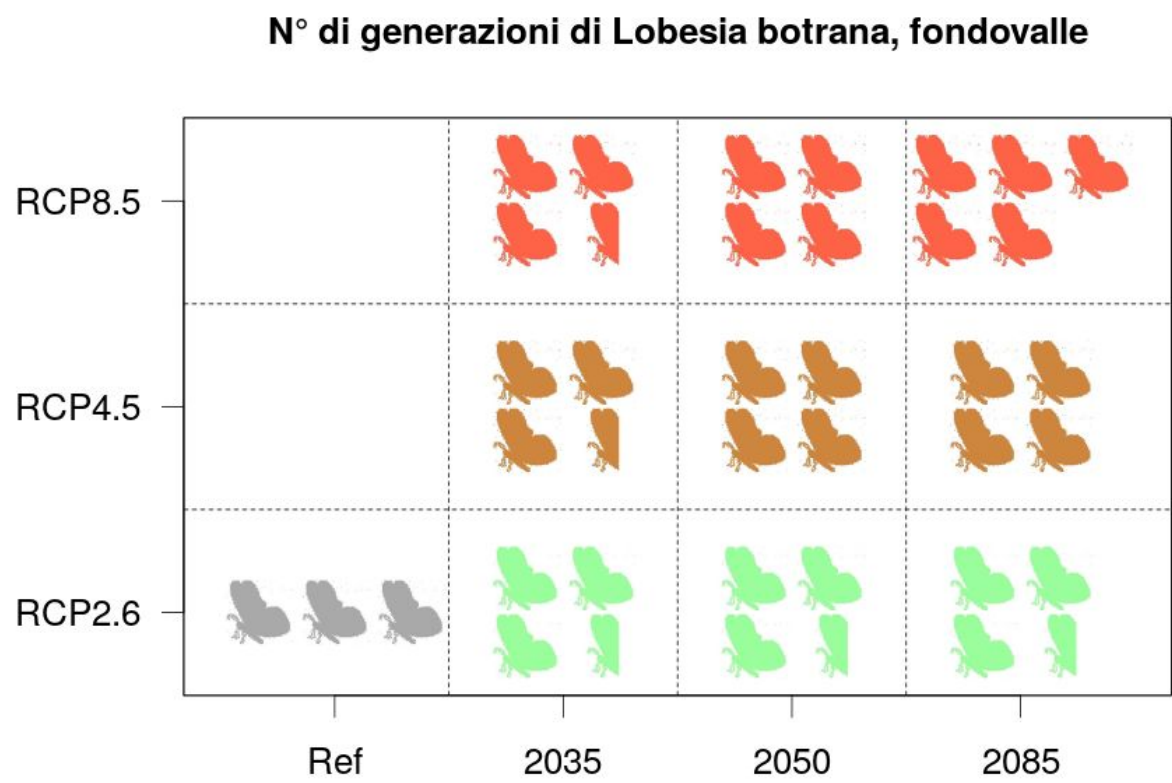
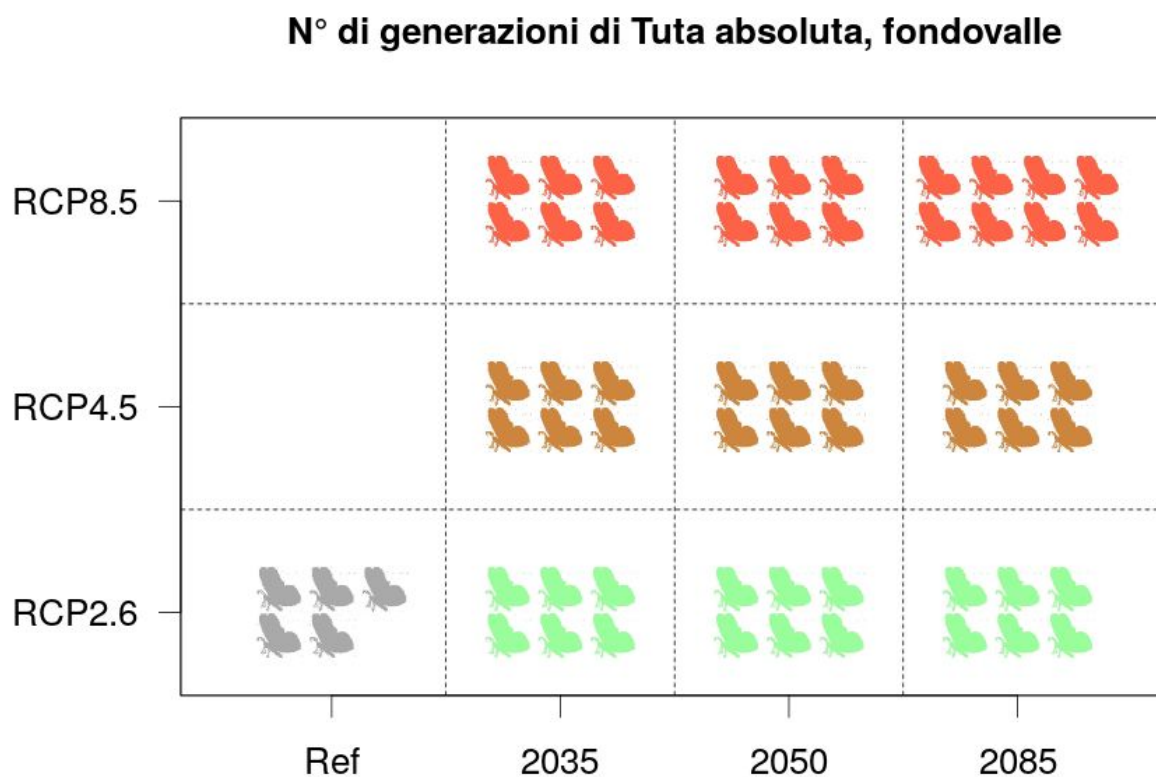


Figura 3.4. Variazione del numero di generazioni di Lobesia Botrana (tignoletta della vite) nel fondovalle.



**Figura 3.5. Variazione del numero di generazioni di Tuta absoluta nel fondovalle.**

In conclusione, per le tre specie di parassiti considerati, si prevede un aumento del numero di generazioni all'anno dal 2035 nei fondovalle. Saranno necessarie diverse risposte e azioni di adattamento per gestire questi cambiamenti nel ciclo di vita dei patogeni, il più ovvio dei quali sarà l'estensione del periodo di controllo attivo dei patogeni accompagnato dall'attuazione di misure preventive (CH2014-Impatti, 2014).

#### *Viticoltura*

La viticoltura come tutte le pratiche agricole potrebbe essere fortemente influenzata dai cambiamenti climatici. Il riscaldamento osservato negli ultimi decenni ha già portato ad un anticipo significativo nelle fasi fenologiche (germogliamento, fioritura e invaiatura), un aumento delle temperature durante la fase di maturazione, un anticipo della raccolta e cambiamenti nelle caratteristiche biochimiche delle uve, in particolare il rapporto zucchero/acido e la differenza tra l'accumulo di zuccheri e quello di polifenoli e componenti aromatici (si veda ad esempio Quénol et al., 2017, Moriondo et al., 2013, progetto LACCARE [www6.inra.fr/laccave](http://www6.inra.fr/laccave) ). Nei prossimi anni si potranno verificare effetti positivi legati a condizioni bio-climatiche più favorevoli che potrebbero portare ad una migliore produttività di alcuni vitigni ed alla potenziale estensione delle aree coltivabili, ma sarà necessario un adattamento delle pratiche viticole secondo le variazioni fenologiche e fisiologiche attese (es. anticipazione delle date di raccolta per alcuni vitigni e variazione delle caratteristiche biochimiche delle uve). Le conseguenze sulla composizione finale di uva e vino sono difficili da prevedere perché dipendono dagli effetti del riscaldamento sulla resa e da

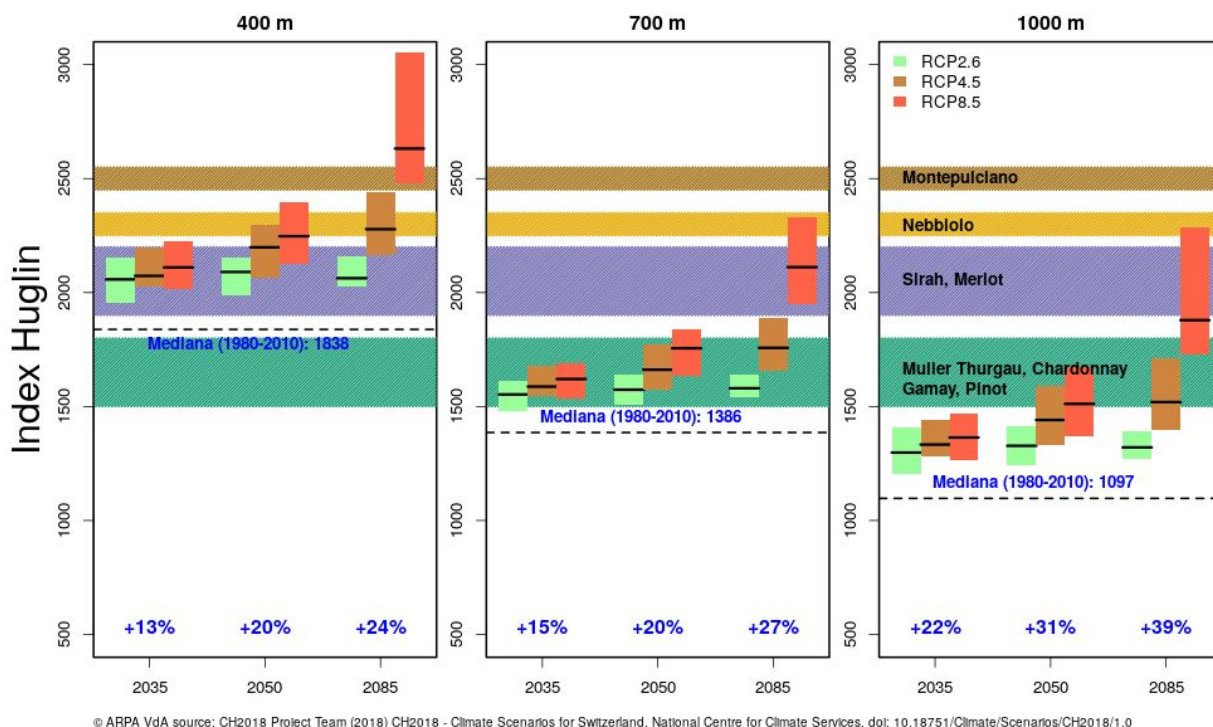


tutte le complesse interazioni tra una maggiore disponibilità di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera per fotosintesi, temperature medie, siccità e stress. (progetto LACCAVE 2018).

L'evoluzione della vocazionalità climatica del EMB alla viticoltura è stata analizzata utilizzando l'indice di Huglin (Figura 3.6, Huglin 1978). Questo indice è ampiamente usato in letteratura per analisi di vocazionalità e di impatto (ad esempio Quénolet et al., 2017, Moriondo et al., 2013, Malheiro et al 2010, CH2014-Impacts, 2014) perché quantifica le condizioni ideali per la coltivazione dei vari vitigni. L'indice di Huglin si basa sul concetto secondo cui ogni varietà richiede una certa quantità di calore accumulato durante la stagione vegetativa per crescere efficacemente.

A 400 m nel prossimo futuro (2035) avremo condizioni troppo calde per i vitigni che necessitano di condizioni fresche (vitigni "freschi") come Chardonnay, Muller Thurgau, Gamay e Pinot. D'altra parte, le condizioni climatiche diventeranno ideali per Syrah e Merlot; dal 2050 avremo condizioni potenzialmente ottimali per i nuovi vitigni tipici dei climi più caldi come il Nebbiolo e il Montepulciano. Ad un'altitudine più elevata (700 m) nel 2035, sono previste condizioni bio-climatiche ideali per i vitigni "freschi" ma anche per Syrah e Merlot alla fine del secolo. A 1000 m, nuove opportunità per la coltivazione di vitigni "freschi" emergono dalla metà del secolo. In conclusione, la coltivazione della vite nel EMB trarrà beneficio dal riscaldamento globale: l'aumento delle temperature potrebbe consentire ai viticoltori di piantare una gamma più ampia di varietà di vite e potenzialmente a quote maggiori rispetto alla situazione attuale.

Tuttavia, si dovrebbe anche considerare che se il riscaldamento segue lo scenario più pessimistico (RCP 8.5), potrebbero verificarsi impatti negativi legati allo stress da calore, siccità o eventi estremi, specialmente a bassa quota. L'interpretazione dei risultati presentati deve anche tenere conto del fatto che l'indice di Huglin è calcolato in base a scenari climatici per fasce di quota che non consentono di valutare l'effetto delle condizioni microclimatiche, come ad esempio l'effetto combinato di pendenza ed esposizione o i fenomeni di inversione termica, le caratteristiche pedologiche e di fertilità del suolo.



**Figura 3.6. Scenari per l'evoluzione dell'indice di Huglin a 400, 700 e 1000 m.** Il colore delle barre rappresenta i valori dell'indice per diversi scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati. La linea orizzontale nera tratteggiata rappresenta i valori dell'indice per il periodo 1980-2010. I rettangoli colorati rappresentano i valori ottimali dell'indice per alcuni vitigni.

### *Gelate tardive*

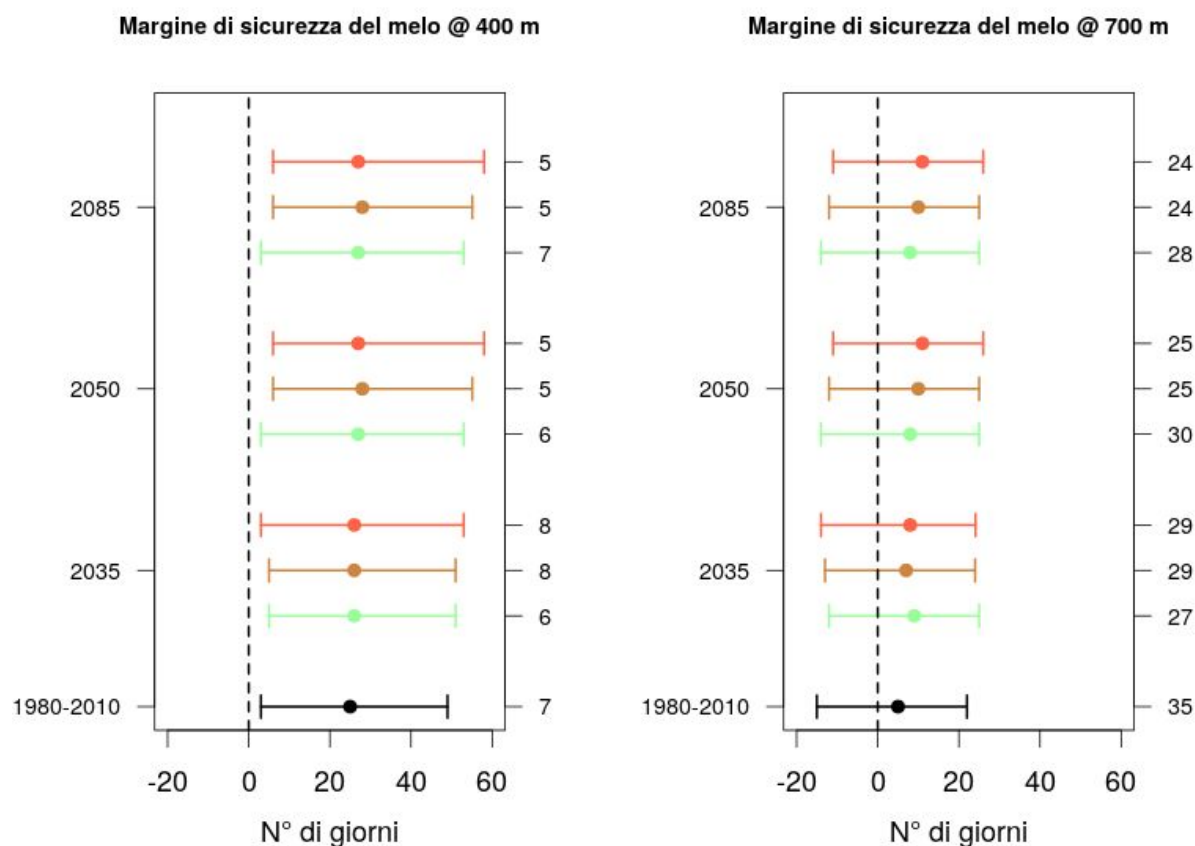
Le gelate tardive sono un esempio di fenomeno climatico che può avere un impatto molto forte sull'agricoltura di montagna. L'anno 2017 ha fornito una testimonianza molto chiara di questi effetti: una primavera mite e precoce (marzo e aprile) ha portato ad una fioritura molto precoce, nell'ordine di diverse settimane (Figura 2.9); il 10 aprile una gelata tardiva ha causato danni molto importanti alle giovani foglie e fiori di queste specie delle principali colture (vite, melo, albicocco), portando a perdite di produttività del 70-80% in Valle d'Aosta e nel Vallese.

Per analizzare la vulnerabilità delle principali colture del EMB alle gelate tardive è stato utilizzato il concetto di “margine di sicurezza”. Questo indicatore calcola il numero di giorni che intercorrono tra l'ultimo giorno di gelo e la data di germogliamento o fioritura. Un margine di sicurezza positivo indica che il germogliamento o la fioritura avviene dopo la data dell'ultimo giorno di gelo, mentre un margine di sicurezza negativo indica che l'ultimo giorno di gelo si verifica dopo lo sviluppo di vegetazione, quindi implicando potenziali danni alle colture.

L'evoluzione del rischio di gelate tardive con i cambiamenti climatici è attualmente oggetto di ricerca. È da un lato dimostrato che, negli ultimi decenni in Svizzera (1975-2016), sopra gli 800 m di altitudine, il rischio di gelo per gli alberi da frutto è aumentato dal 20% al 40% (Vitasse et al., 2018), ma d'altra parte le gelate tardive in alta montagna (> 2000 m) non sono aumentate negli ultimi decenni (Klein et al., 2018). Vitasse et al. (2018) sottolinea che l'avanzamento della primavera può essere limitato dall'effetto congiunto del fotoperiodo (limite allo sviluppo della vegetazione se la lunghezza del giorno non è ancora sufficiente) e di un accumulo insufficiente di freddo durante l'inverno andando quindi a ridurre il rischio di gelate tardive.

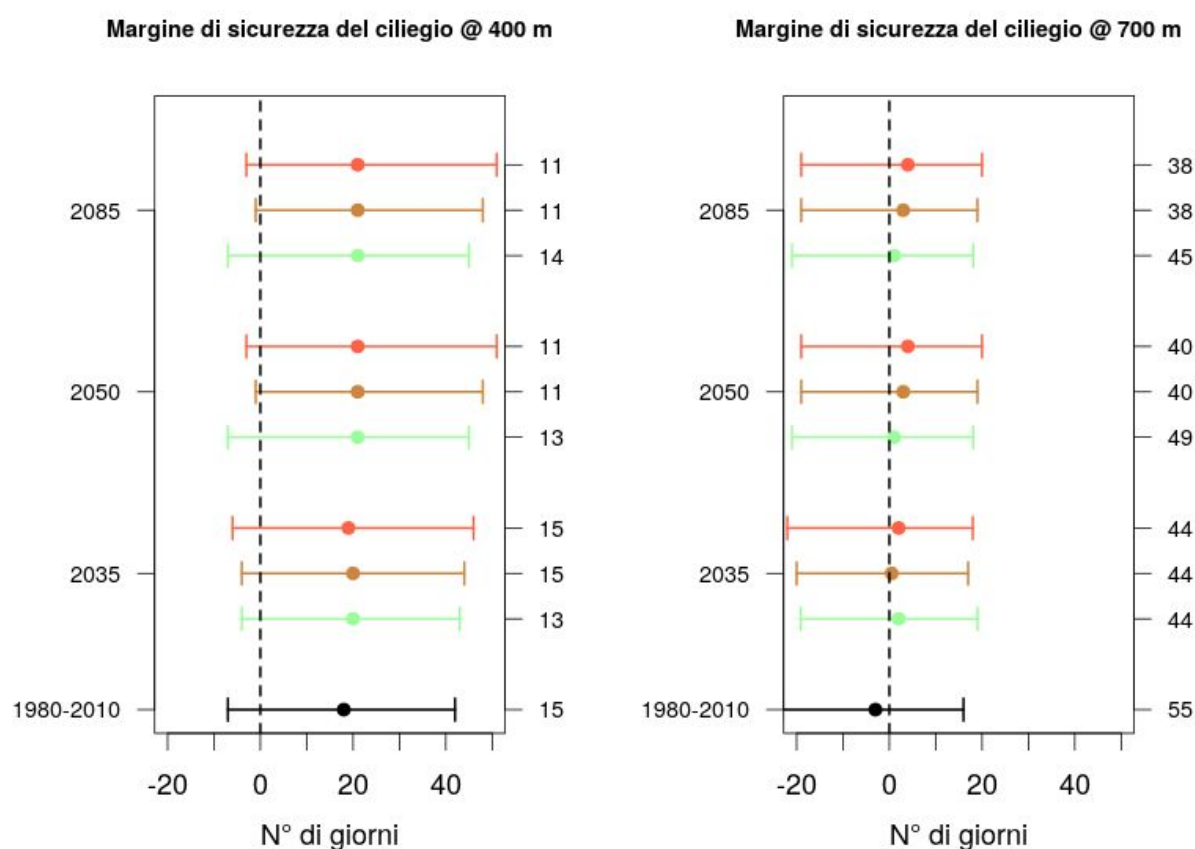
Al fine di modellare questo fenomeno, abbiamo calcolato il margine di sicurezza attuale e futuro per alcune colture significative. Diversi modelli fenologici, che includono il ruolo del fattore di raffreddamento invernale (Hufkens et al., 2018), sono stati ottimizzati grazie ai dati fenologici e meteorologici osservati da MétéoSuisse negli ultimi decenni (fonte: MétéoSuisse), al fine di definire il modello più preciso per il calcolo dell'attuale margine di sicurezza per due specie (ciliegia e mela).

La Figura 3.7 mostra gli scenari di evoluzione del margine di sicurezza del melo: per il periodo di riferimento (1980-2010) a 400 m di altitudine, il margine di sicurezza medio è di oltre 20 giorni e le gelate tardive si verificano nel 7% degli anni (asse destro sul grafico). A 700 m, il margine di sicurezza per il periodo di riferimento è inferiore a 5 giorni, il rischio di gelate tardive è del 35%. Gli scenari futuri prevedono che nei prossimi decenni (2035) il margine di sicurezza aumenterà 700 m (dal 35% al 27/29%) e rimarrà pressoché invariato a 400 m. A metà (2050) e fine (2085) secolo il rischio si ridurrà a tutte le fasce di quota.



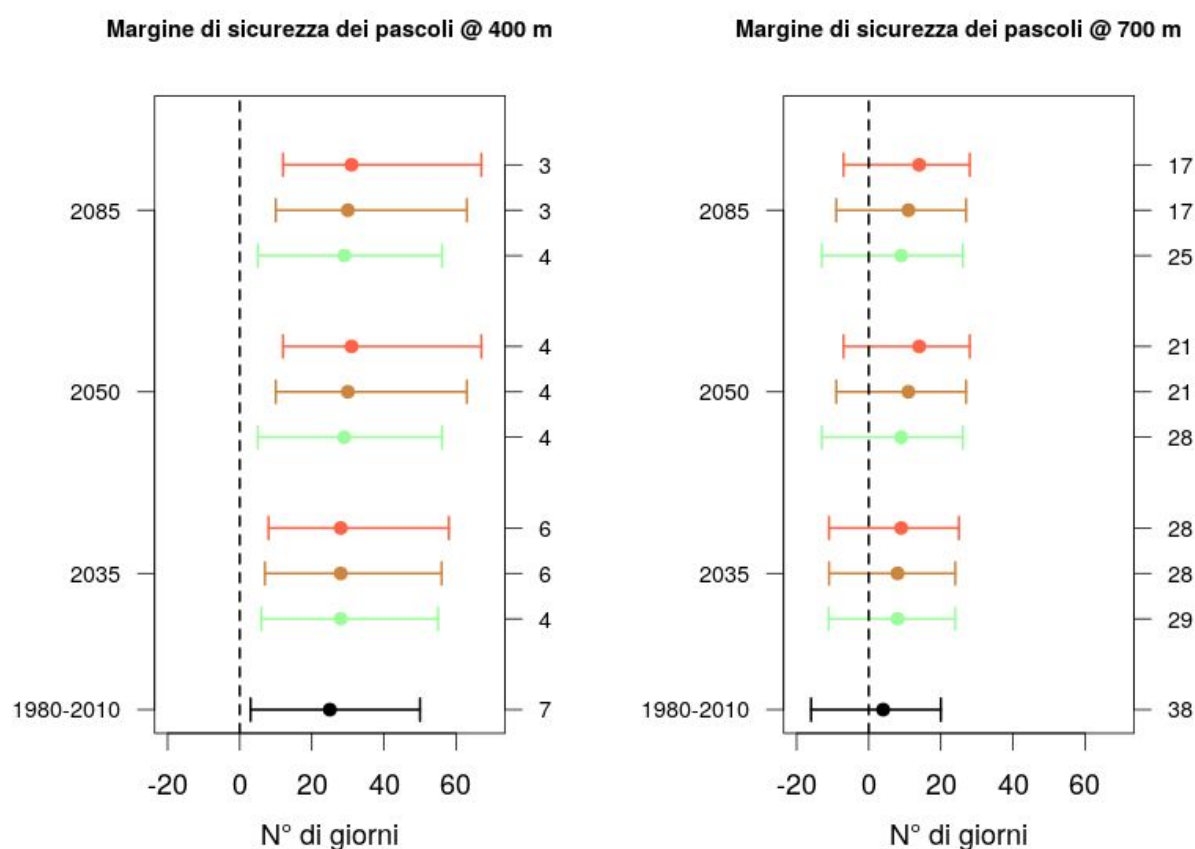
**Figura 3.7. Scenari di evoluzione del margine di sicurezza del rischio di gelate tardive per il melo a 400 e 700 m.** Le linee orizzontali rappresentano la variabilità del margine di sicurezza e le previsioni per il futuro (quantile 10, quantile 90); il punto centrale indica la mediana. Il colore delle linee rappresenta i diversi scenari climatici (verde RCP 2.6, marrone RCP 4.5 e rosso RCP 8.5). La linea nera rappresenta il periodo di riferimento corrente. L'asse destro mostra la percentuale di anni con gelate tardive per il periodo di riferimento.

Risultati simili sono stati ottenuti per il ciliegio (Figura 3.8). Il ciliegio è una specie più precoce del melo e il suo margine di sicurezza è quindi inferiore. Nel periodo di riferimento (1980-2010), a 400 m il margine di sicurezza è minore di 20 giorni e la probabilità di gelate tardive è del 15%. A 700 m, l'attuale margine di sicurezza medio è vicino allo zero, il che significa che le gelate tardive per il ciliegio possono verificarsi con elevata probabilità (55%). Gli scenari futuri prevedono che questo rischio potrebbe diminuire già nel 2035 sia a 400 m che a 700 m, pur rimanendo più elevato che per il melo. Considerando tutti gli scenari, è attesa una riduzione del rischio di gelate tardive soprattutto a 700 m e da metà secolo.



**Figura 3.8. Scenari di evoluzione del margine di sicurezza del rischio di gelate tardive per il ciliegio a 400 e 700 m.** Le linee orizzontali rappresentano la variabilità del margine di sicurezza e le previsioni per il futuro (quantile 10, quantile 90); il punto centrale indica la mediana. Il colore delle linee rappresenta i diversi scenari climatici (verde RCP 2.6, marrone RCP 4.5 e rosso RCP 8.5). La linea nera rappresenta il periodo di riferimento corrente. L'asse destro mostra la percentuale di anni con gelate tardive per il periodo di riferimento.

Le gelate tardive possono anche essere avere impatti anche sulle risorse pastorali: con la fusione precoce della neve, i prati possono svilupparsi anticipatamente all'inizio della primavera, esponendosi al rischio di gelate tardive che possono degradare sia la qualità che la quantità di foraggio (Chaix et al., 2017). Per la stima dell'evoluzione del margine di sicurezza dei pascoli, le date di rinverdimento e inizio della crescita sono state calcolate a partire da immagini satellitari (MODIS (2002-2018), Filippa et al., 2017). I risultati sono simili a quelli ottenuti per melo e ciliegio (Figura 3.9). L'attuale margine di sicurezza è minore a 700 m (meno di 5 giorni) rispetto a 400 m (più di 20 giorni). Il rischio di gelo è quindi maggiore a questa altitudine (38% rispetto al 7%). Gli scenari futuri prevedono che questo rischio possa diminuire dal 2035 e che alla fine del secolo il rischio sarà del 3-4% a 400 m e del 17-25% a 700 m.



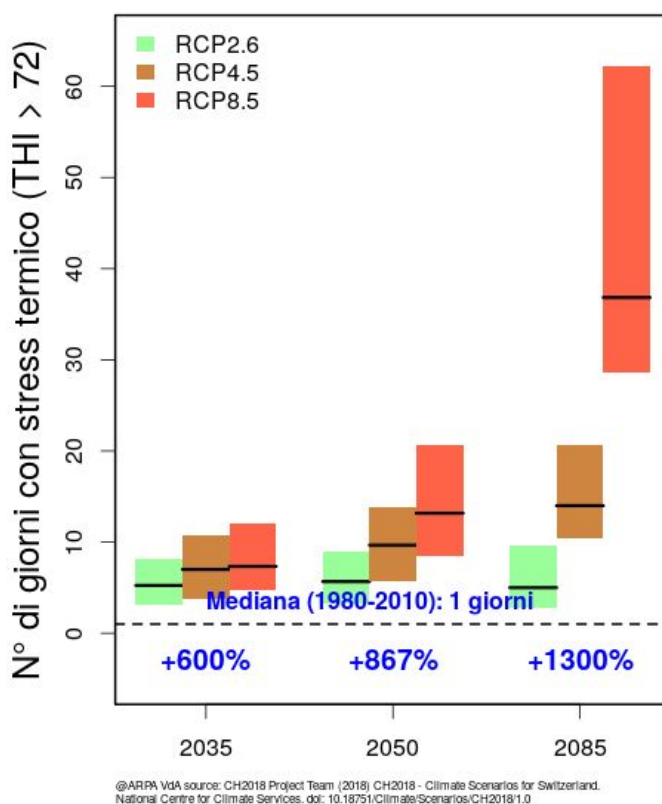
**Figura 3.9. Scenari di evoluzione del margine di sicurezza del rischio di gelate tardive per i pascoli a 400 e 700 m.** Le linee orizzontali rappresentano la variabilità del margine di sicurezza e le previsioni per il futuro (quantile 10, quantile 90); il punto centrale indica la mediana. Il colore delle linee rappresenta i diversi scenari climatici (verde RCP 2.6, marrone RCP 4.5 e rosso RCP 8.5). La linea nera rappresenta il periodo di riferimento corrente. L'asse destro mostra la percentuale di anni con gelate tardive per il periodo di riferimento.

In conclusione, le analisi presentate suggeriscono una **tendenza generale alla riduzione del rischio di gelate tardive per le tre colture considerate, una riduzione che sarà maggiore a 700 m**. I principali limiti di questa analisi, che sottolineano la necessità di ulteriori approfondimenti, sono:

- per melo e ciliegio, l'analisi non è basata su osservazioni fenologiche realizzate nei tre paesi ma solo in Svizzera;
- non è stato considerato il ruolo delle varietà
- l'analisi è stata condotta solo per fasi fenologiche tardive (50% di fioritura, per gli alberi e massima crescita vegetativa per i pascoli): L'analisi di fasi più precoci è uno dei primi approfondimenti necessari
- i modelli fenologici non sono stati ottimizzati separando le popolazioni a due livelli altitudinali e quindi i risultati ottenuti possono trascurare l'effetto dell'adattamento genetico delle diverse popolazioni, anche se questo effetto è certamente secondario al controllo ambientale.

### Stress termico per le vacche da latte

L'aumento delle temperature estive può portare a situazioni di stress termico per le vacche da latte, che influiscono quindi sulla produzione di latte. Questo tipo di stress può essere stimato con l'indice THI (indice temperatura-umidità, Thom 1958) che considera l'effetto combinato della temperatura e dell'umidità dell'aria sul comfort termico degli animali; le condizioni di stress termico provocano una riduzione della qualità e della quantità del latte prodotto. Oggi le mucche possono essere sotto stress (soglia  $THI > 72$ ) 1 giorno all'anno in media nei fondovalle (Figura 3.10). Il numero di giorni di stress potrebbe essere da 5 a 12 giorni nel 2035, da 5 a 20 nel 2050 e da 5 a 60 alla fine del secolo, portando a effetti significativi sulla produzione di latte delle mandrie che rimangono nei fondovalle durante l'estate. Sarà potenzialmente necessario mettere in atto misure di adattamento nella gestione della mandria (ad esempio salendo più in alto e prima in quota), al fine di ottimizzare i regimi termici e di alimentazione delle mucche di fronte alle estati torride (CH2014-Impacts, 2014). La qualità delle risorse foraggere è anche un fattore importante che potrebbe influenzare la quantità e la qualità del latte prodotto; possiamo quindi prevedere che, in presenza di siccità estiva, la produzione di latte potrebbe essere ridotta. In conclusione si può dire che **nei fondovalle, il numero di giorni in cui le vacche da latte saranno sotto stress a causa del calore aumenterà**, portando ad un aumento del rischio di calo della produzione di latte.



**Figure 3.10. Variazione dello stress termico per le vacche da latte (THI index).** Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati.

Una delle sfide più importanti, direttamente collegata ai casi studio presentati, sarà correlata al cambiamento nella frequenza e intensità di eventi estremi (ondate di calore, siccità, precipitazioni

estreme, cfr. 1.3) che aumenteranno i rischi. impatto sulla produttività di diverse colture. In questo contesto, le politiche di adattamento dovrebbero concentrarsi sulla gestione di questi rischi con, ad esempio, l'ottimizzazione e la diffusione delle pratiche di irrigazione, la gestione dei conflitti nell'uso dell'acqua e possibilmente la diffusione di strumenti assicurativi (CH2014-Impacts, 2014).

### 3.3 Foreste

Fortemente influenzate dalle condizioni climatiche e dalle attività umane, le foreste montane sono molto sensibili ai cambiamenti climatici che ne stanno modificando la fisiologia, la crescita, la distribuzione, le interazioni con agenti patogeni e l'esposizione a disturbi (tempeste, incendi ...). Le foreste offrono servizi ecosistemici fondamentali come la produzione di legno, la regolazione del ciclo dell'acqua e dei feedback biofisici, il sequestro e lo stoccaggio di CO<sub>2</sub>, la conservazione di biodiversità e la protezione da caduta massi, inondazioni torrenziali e valanghe. L'efficacia e la persistenza di questi servizi è minacciata dai cambiamenti climatici: eventi estremi come incendi, siccità o tempeste incidono sulla sopravvivenza dei popolamenti forestali e quindi sui servizi ecosistemici offerti alle popolazioni umane (Elkin et al. , 2013; Linder et al.2010).

È quindi necessario conoscere come le foreste possono adattarsi e rispondere ai cambiamenti climatici. Non è stato possibile in questo rapporto realizzare un'analisi quantitativa completa ed esaustiva degli impatti dei cambiamenti climatici sulle foreste (ad es. stress, mortalità, distribuzione delle specie, modifica della produzione di legno, riduzione dell'effetto protettivo, incendi, ...). Utilizzando analisi bibliografiche e/o valutazioni preliminari, sono stati introdotti in questo rapporto alcuni fenomeni particolarmente importanti: variazione della distribuzione delle specie, espansione della foresta, variazioni di produttività e rischio di proliferazione di parassiti e malattie.

#### *Cambiamenti nella composizione dei popolamenti forestali*

Le condizioni climatiche degli ambienti forestali del EMB saranno modificate principalmente dall'aumento di temperatura, dalla ridistribuzione delle precipitazioni, dall'allungamento del periodo di crescita e dall'intensificazione del deficit idrico estivo. Alcune specie potranno scomparire localmente ed essere sostituite da nuove specie che arrivano dai livelli altitudinali inferiori. Al di sotto di 1500 m, è previsto l'incremento di latifoglie varie o conifere termofile (amanti del calore) come il pino silvestre che potrebbero competere in modo efficace con l'abete rosso. L'abete rosso è infatti una specie particolarmente sensibile alla siccità, alle tempeste di vento (specialmente in stand monospecifici e coetanei) e ai patogeni. Si può quindi attendere un aumento della mortalità degli abeti rossi sul limite inferiore della loro distribuzione negli anni a venire.

A livello del limite superiore del bosco, gli effetti varieranno a seconda della specie. Gli abeti rossi troveranno condizioni più favorevoli per il loro sviluppo più in alto e al limite superiore della loro distribuzione. Ontani verdi e arbusteti continueranno a colonizzare aree di difficile accesso, come corridoi di valanghe e pascoli alpini abbandonati. A più lungo termine, il pino cembro e il pino uncinato occuperanno una superficie maggiore di quella attuale, in particolare in prossimità di falde detritiche e ghiaioni. Il larice, specie più resistente, colonizzerà ampie aree in quota e negli ambienti di transizione (Schumacher e Bugmann, 2006).

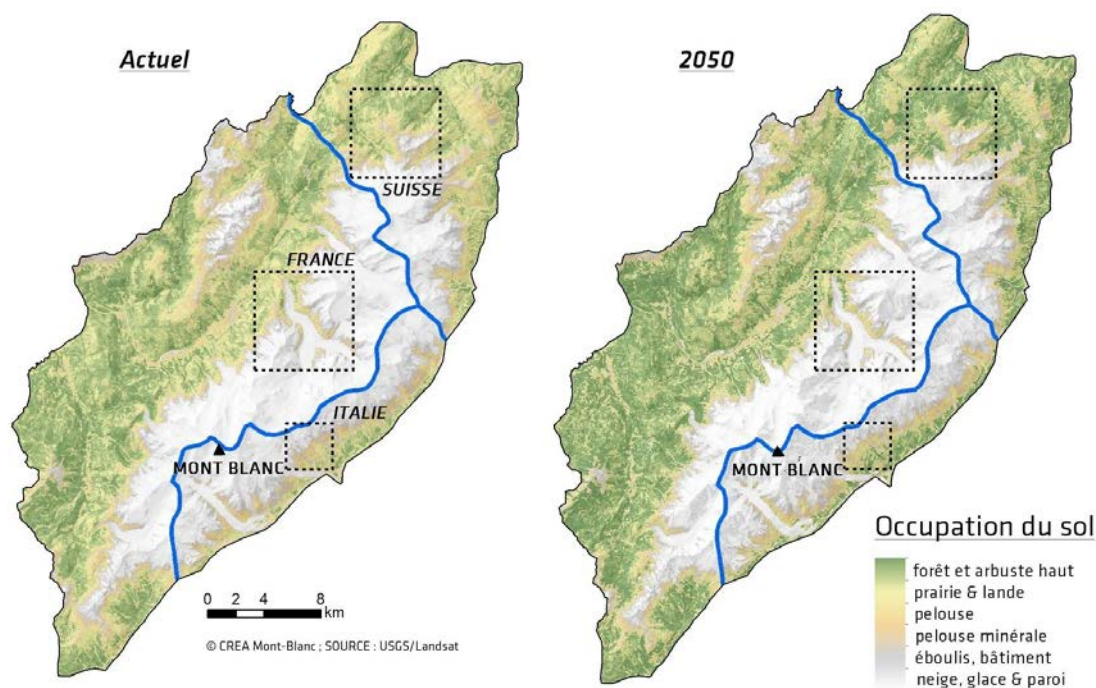


### *Espansione della foresta*

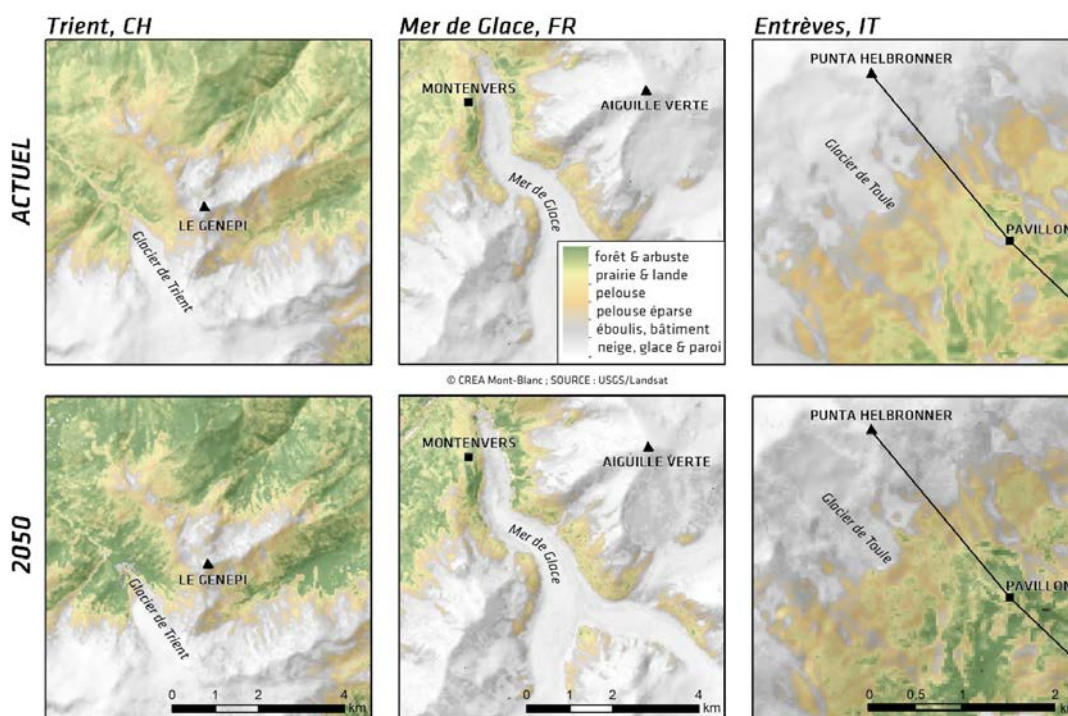
L'aumento delle temperature che porta a una stagione di crescita più lunga (cfr. 2.5), combinato con inverni più miti favorirà la migrazione dei popolamenti forestali verso quote maggiori. Nel massiccio del Mont-Blanc, l'altitudine media della foresta è aumentata di 60 m tra il 1952 e il 2006 (Martin, 2014) e le simulazioni prevedono un'ulteriore salita che potrebbe raggiungere i 100 m nel 2050 a seconda delle specie delle condizioni topografiche, microclimatiche ed edafiche (Schumacher e Bugmann, 2006). La migrazione della foresta verso quote maggiori non è solamente causata dall'aumento delle temperature ma anche dalla riduzione della pressione del pascolo e dall'abbandono della pastorizia in alcune aree. A lungo termine, lo sviluppo delle foreste di altitudine fornirà una protezione aggiuntiva contro frane, lave torrentizie e valanghe (Lindner et al., 2010), ma modificherà considerevolmente i paesaggi. Nel massiccio del Mont-Blanc, alcune aree potrebbero vedere scomparire i loro prati alpini a favore della foresta, modificando notevolmente l'aspetto delle montagne con ripercussioni sul turismo e sulle attività locali (vedi 3.5).

Le figure 3.11 e 3.12 mostrano esempi di scenari dell'evoluzione della distribuzione degli ecosistemi attorno al Monte Bianco basati sull'estrapolazione delle dinamiche della vegetazione osservate negli ultimi anni (1987-2017). Abbiamo utilizzato un indice di produttività della vegetazione (NDVI), calcolato dalle immagini satellitari Landsat. Le estrapolazioni tengono conto delle dinamiche locali della vegetazione osservate dal satellite, ma non tengono conto degli scenari climatici (assumono una dinamica uguale in futuro a quella osservata in passato) o di cambiamenti nelle attività umane (intensità pascolo ...) o di non linearità del fenomeno. Tuttavia, questo metodo consente di presentare tendenze evolutive dei paesaggi futuri. Anche il ritiro glaciale, che libererà nuovi spazi per la colonizzazione delle piante, non è incorporato in queste proiezioni perché i modelli del futuro ritiro glaciale non sono disponibili su scala del massiccio. Le figure 3.11 e 3.12 mostrano i cambiamenti dell'ecosistema previsti per il 2050: l'ascesa di foreste e arbusti è molto evidente nei versanti meridionali, nonché l'aumento dell'area occupata da pascoli e arbusteti che continueranno a colonizzare ambienti rocciosi. E' prevista anche una densificazione delle foreste, a meno che l'attività pastorale non riacquisti intensità.

## CHANGEMENTS DE VEGETATION à l'horizon 2050



**Figura 3.11. Mappe di habitat del massiccio del Monte Bianco per il periodo attuale e per il 2050**, basate su un indice di produttività delle vegetazione (NDVI) rilevato dal satellite tra il 1984 e il 2017 ed estrapolato per il futuro (con un modello lineare calibrato a livello di pixel). I rettangoli indicano gli zoom presentati nella figura seguente (3.12).

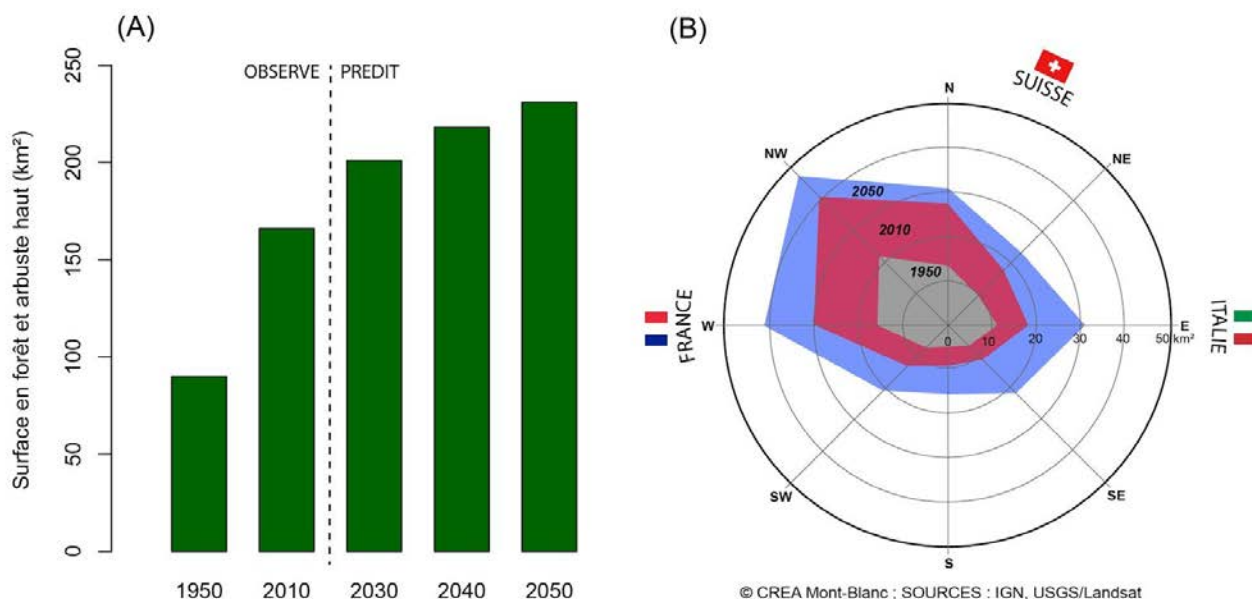


**Figura 3.12. Zoom su diversi settori in Svizzera (Trient), Francia (Chamonix) e Italia (Entrèves)** che indicano i cambiamenti di vegetazione previsti tra il periodo attuale e il 2050. A Trient, possiamo distinguere una forte densificazione e un aumento della foresta e degli arbusti. Nel sito di Montenvers, si può notare un'espansione della foresta sia lungo i versanti che a livello della lingua terminale della Mer de Glace. Sul versante italiano vediamo che la foresta probabilmente supererà la stazione intermedia della Skyway al Pavillon.

### *Aumento della superficie e della produttività delle foreste di montagna*

Nelle aree montane, dove le basse temperature frenano la crescita degli alberi, la produzione di biomassa probabilmente aumenterà a causa del riscaldamento, portando ad una maggiore produttività ed alla densificazione dei popolamenti (Schumacher e Bugmann, 2006). L'allungamento della stagione di crescita, l'aumento della concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> disponibile per la fotosintesi e le deposizioni di azoto legate alle attività umane accelereranno la produttività primaria. Una crescita più rapida degli alberi può favorire la silvicoltura, ma a condizione che i gestori delle foreste favoriscano la diversità delle specie e vengano messe in atto le pratiche selvicolturali necessarie a favorire la resilienza dei popolamenti rispetto a rischi crescenti come il rischio di siccità estivo e le minacce rappresentate dai patogeni (Courbaud e al., 2010).

La Figura 3.13 mostra l'evoluzione dell'estensione della superficie forestale del massiccio del Monte Bianco, osservata dagli anni '50 e proiettata al 2050. E' previsto un aumento dell'area occupata dalla foresta, che va dai 90 km<sup>2</sup> degli anni '50 ai 230 km<sup>2</sup> del 2050, e questo principalmente sulle pendici svizzere e francesi del massiccio. Questa dinamica ha già portato a un aumento osservato di circa l'85% della superficie forestale tra il 1952 e il 2006 dovuta sia al riscaldamento globale sia alla riduzione delle attività agricole (Martin, 2014). Questo aumento della superficie e della produttività delle foreste si tradurrà in un incremento del servizio di sequestro e stoccaggio del carbonio, ma porterà anche a una graduale modifica dei paesaggi del EMB, con conseguenze paesaggistiche, culturali e potenzialmente turistiche (cfr. 3.5).



**Figura 3.13. (A) Evoluzione della superficie forestale nel massiccio del Monte Bianco tra il 1950 e il 2050 e (B) distribuzione dell'area forestale per esposizione.** L'analisi dell'evoluzione tra il 1950 e il 2010 si basa su immagini aeree, mentre le stime per il periodo 2015- Il 2050 si basano sull'extrapolazione dei trend osservati utilizzando archivi di satellitari (1980-2019).

### *Diffusione di parassiti e patogeni forestali*

Come per l'agricoltura, l'aumento delle temperature può favorire alcuni parassiti e malattie che saranno in grado di diffondersi e riprodursi più rapidamente sugli alberi (Rebetez e Dobbertin, 2004). Un esempio

su tutti è quello del bostrico dell'abete rosso (*Ips typographus*), un piccolo insetto dell'ordine degli scarabei, che attacca l'abete rosso portando in alcuni casi alla morte dell'albero.

Durante l'estate del 2003, sono state osservate aree in cui sono avvenute tre generazioni di bostrico che hanno causato danni molto importanti in numerosi popolamenti di abete rosso in Svizzera e in Francia. Nell'area del Monte Bianco, il bostrico dell'abete rosso ha causato ingenti danni nelle estati del 2014 e 2015, negli anni a venire sono attesi attacchi più grandi.

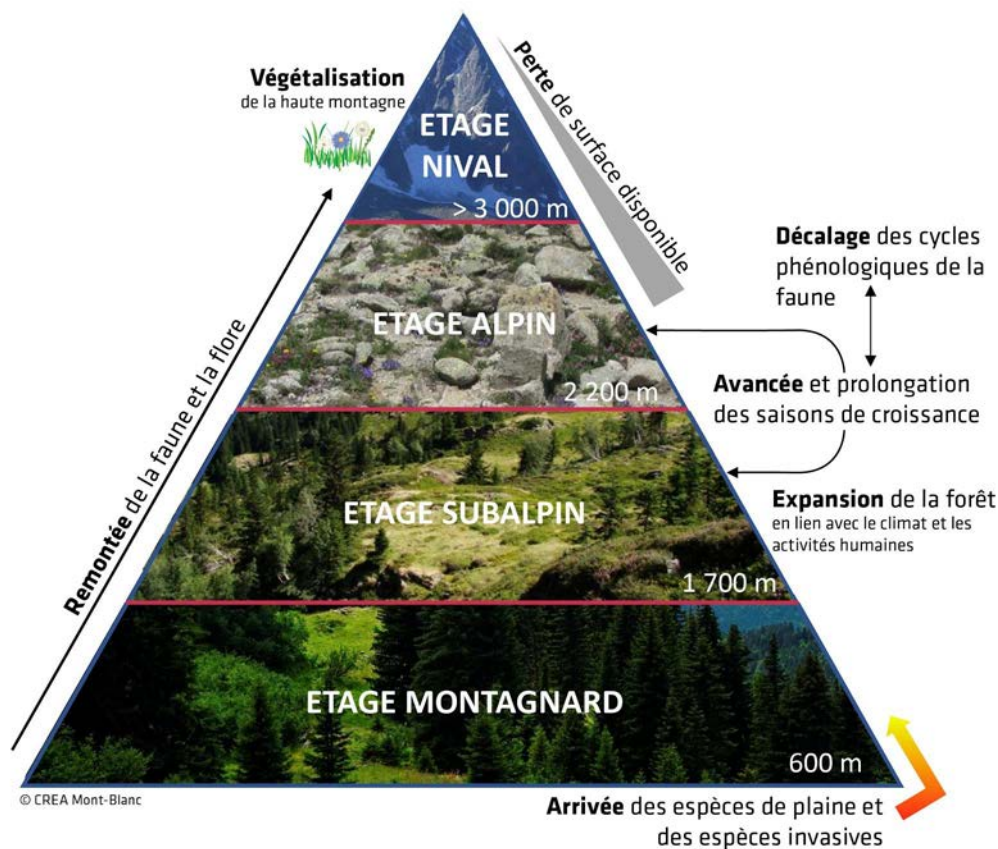
Un altro esempio è rappresentato da un importante parassita del larice: la Tortrice del larice (*Zeiraphera griseana*) potrà ampliare la sua distribuzione spaziale e sarà in grado di svilupparsi di più in quota (Saulnier et al., 2017) con l'aumentare delle temperature. È una farfalla il cui bruco attacca gli aghi di larice, può portare alla completa defogliazione delle chiome e, raramente, alla morte dell'albero. Le piante attaccate sono indebolite e producono dal 50% al 90% in meno di legno. Sono quindi più vulnerabili agli eventi meteorologici estremi e agli attacchi di altri parassiti (Barros et al., 2016, Rebetez e Dobbertin, 2004).

### 3.4 Conservazione del patrimonio naturale e biodiversità

Le aree montane ospitano quasi la metà degli hotspot di biodiversità mondiali (Kohler e Maselli, 2009) e sono caratterizzate da un'eccezionale biodiversità su piccole aree. L'isolamento e la distanza geografica tra queste aree, attraversate da periodi glaciali e interglaciali, hanno contribuito ad un alto tasso di endemismo nelle specie montane (10% per la flora alpina rispetto al 4% in media per flora europea; Aeschimann et al., 2011). È così che le Alpi, e in particolare l'EMB, ospitano specie animali simboliche come l'aquila reale, la pernice bianca, il camoscio o lo stambecco e le piante di alta quota. Oltre alle sfide di conservazione di ciascuna di queste specie, l'evoluzione di queste popolazioni è anche un indicatore dell'evoluzione degli ecosistemi alpini in generale, dei nostri paesaggi e dell'identità alpina in generale.

Questi ecosistemi sono molto vulnerabili ai cambiamenti climatici ed ai disturbi legati alle attività umane. Le specie animali e vegetali saranno influenzate dai cambiamenti climatici e dalle perdite habitat in modo variabile in funzione delle loro caratteristiche ecologiche e biologiche. Le specie migreranno, si adatteranno a nuove condizioni o si estingueranno localmente (Figura 3.14). Questi cambiamenti saranno più significativi nella fascia altitudinale intorno ai 2000 m, dove verrà modificata la distribuzione del 50% degli uccelli e del 40% delle piante (CH2014-Impacts, 2014). Nelle sezioni seguenti, vengono sintetizzati i principali processi che potrebbero influire sulla biodiversità del EMB con l'obiettivo di fornire un quadro d'insieme delle necessità di adattamento delle strategie di gestione delle aree naturali nel EMB.





**Figura 3.14. Schema concettuale dei principali processi che influenzeranno l'evoluzione della biodiversità del EMB nei prossimi decenni.** Le altitudini indicate sono approssimative e individuate in base alle condizioni attuali.

#### *Impatti sulla flora: risalita delle specie*

Le specie vegetali migreranno verso i limiti superiori del loro habitat attuale, o addirittura al di sopra di esso (Steinbauer et al., 2018). Questo processo viene definito termofilizzazione. In fondo valle (600 - 1700 m), le piante continueranno a migrare verso il margine della foresta ed alle quote superiori (Erschbamer et al., 2011). Gli ecosistemi di media montagna saranno trasformati dall'arrivo di piante più competitive e potenzialmente invasive dal fondovalle (Pauchard et al., 2009). Analogamente, le specie vegetali della fascia subalpina (1700-2200 m) migreranno a quote maggiori e raggiungeranno la base della fascia alpina (Pauli et al., 2007, Gottfried et al., 2012; Steinbauer et al., 2018) aumentando la competizione per lo spazio e le risorse.

Le specie alpine accumuleranno potenzialmente quello che viene chiamato debito climatico, vale a dire un'incapacità di adattamento ai cambiamenti dell'ambiente (Dullinger et al., 2012). Ad alta quota (> 3000 m), le condizioni diventano più favorevoli per le specie alpine che potranno iniziare a colonizzare aree attualmente non colonizzabili per limiti climatici. Uno studio condotto nel Parco nazionale degli Ecrins mostra che l'indice di vegetazione (NDVI), che misura la produttività delle piante (ovvero la produzione di biomassa), è aumentato tra il 2000 e il 2015 e in particolare in ambienti rocciosi sopra i 2500 m di altitudine (Carlson et al., 2017). Analogamente in Svizzera ad esempio sul Piz Linard (3.410 m) per il 75% delle specie studiate, il numero di individui è aumentato dal 1835 (Wipf et al., 2013).

In generale, l'estensione del periodo senza neve e l'aumento delle temperature favoriscono la migrazione in quota delle specie e l'aumento della produzione di biomassa dalle piante di montagna (Choler et al., 2015). D'altra parte queste piante, e in particolare quelle degli alpeggi, sono sensibili agli eventi estremi.

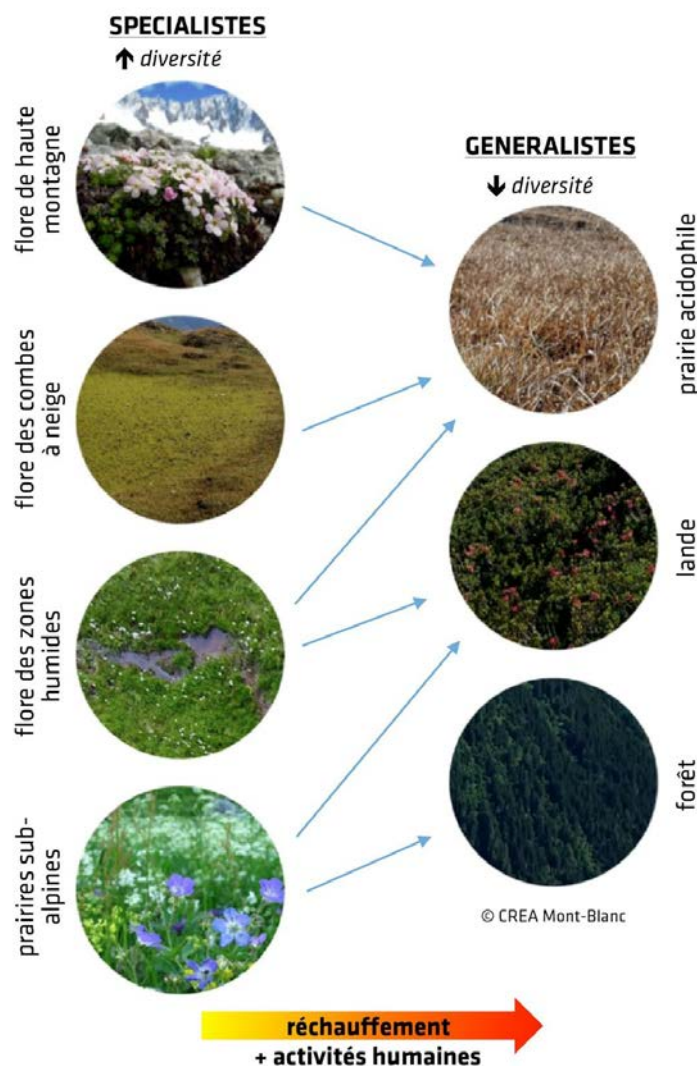
Quando le ondate di calore saranno associate a siccità si potranno verificare fenomeni di ingiallimento e senescenza anticipata nelle comunità subalpine e alpine (Corona et al. 2019, De Boeck et al., 2016, Cremonese et al. 2017).

### *Impatti sulla flora della riduzione dell'innevamento*

Lo spessore del manto nevoso e il periodo di fusione della neve in primavera sono fattori che influenzano in modo importante la fenologia e la distribuzione spaziale delle piante alpine (Wheeler et al., 2014; Wipf et al., 2009). L'allungamento del periodo senza neve attenuerà i vincoli climatici che agiscono sulle piante: la flora alpina conosciuta come "specialista" e adattata ad una lunga copertura nevosa, rischia di essere sostituita gradualmente da specie più generali e competitive. Le primavere precoci possono anche rappresentare dei rischi per le piante: la fusione del manto nevoso può esporre le piante al rischio di gelate tardive (Wheeler et al., 2014; Wipf et al., 2009). Questi eventi di gelo tardivo si verificano all'inizio della crescita delle piante dopo l'inverno, quando il tessuto vegetale è più sensibile e possono avere un impatto negativo sulla crescita e sulla produttività per tutto il resto della stagione (Galvagno et al., 2013). Gli effetti del gelo tardivo possono ovviamente dipendere dalla specie e dai loro adattamenti fisiologici.

### *Impatti sulla biodiversità e sugli habitat*

I cambiamenti nelle condizioni climatiche hanno conseguenze anche sulla biodiversità e sugli habitat. Si assiste ad un aumento del numero di specie vegetali (o "arricchimento") sopra i 2200 m, il che è un chiaro segnale degli effetti dei cambiamenti climatici: le condizioni stanno diventando favorevoli per le piante da quote più basse. Steinbauer et al. (2018) in uno studio condotto su 302 vette, principalmente nelle Alpi, mostra una dinamica di arricchimento di specie vegetali 5 volte maggiore nel periodo 2007-2016 rispetto a cinquant'anni fa, corrispondente al recente aumento delle temperature. Questo aumento della diversità, tuttavia, nasconde un potenziale declino delle specie alpine, a favore di quelle delle quote inferiori. Il periodo di tempo tra l'arricchimento e il declino specifico dipenderà da diversi fattori quali la longevità e la capacità competitiva delle specie locali, la capacità di dispersione delle piante dal basso e la topografia. In effetti, la salita delle specie alpine sarà vincolata in quota da una riduzione della superficie disponibile a causa della forma conica delle montagne (Dullinger et al., 2012; Pauli et al., 2007) e la presenza di ostacoli come pareti rocciose o ghiacciai, numerosi nel massiccio del Monte Bianco. Allo stesso tempo alcune specie beneficeranno di numerosi micro-rifugi e di nuovi spazi liberati dal ritiro glaciale (Carlson et al., 2014, Fisher et al. 2019). La principale conseguenza del potenziale ritiro di piante specializzate (ad esempio da alta quota o aree coperte di neve) e l'aumento delle specie è il rischio di semplificazione degli ambienti naturali, dove la diversità degli ambienti attualmente presenti nel massiccio potrebbe essere limitata (Figura 3.15).



**Figura 3.15. Schematizzazione delle possibili transizioni della flora montana in un contesto di cambiamento climatico.** La riduzione del manto nevoso e le alte temperature, combinate con l'abbandono delle attività pastorali, possono portare a una "omogeneizzazione" della flora alpina, un processo in cui le specie specializzate rischiano di essere sostituite da piante più generali e competitive. Ad esempio, la diminuzione delle nevicate combinata con estati torride rischia di prosciugare le zone umide di altitudine, impattando in modo negativo la flora e la fauna specifiche che si adattano a questi ambienti. È importante notare che l'elevata variabilità topografica può generare localmente "micro-rifugi" con condizioni sempre favorevoli per le specie alpine.

### Impatti sulla fauna

Lo spessore e la durata del manto nevoso influiscono anche sulle specie animali. Se da una parte la fusione anticipata della neve favorisce un minor consumo di riserve corporee durante il letargo invernale, uno studio fatto nel Parco della Vanoise sulla marmotta alpina ha mostrato possibili impatti negativi sulla fase di riproduzione (Tafari, 2013). Risultati simili sono stati ottenuti in numerosi studi sullo stambecco nel Parco Nazionale del Gran Paradiso (Pettorelli et al., 2007). È probabile che anche altre specie possano essere influenzate negativamente dalla riduzione del manto nevoso (Figura 3.16).

Gli animali di montagna si sono adattati alle condizioni climatiche sincronizzando i loro cicli fenologici con la crescita delle piante e la stagionalità del manto nevoso. La muta della pernice bianca, ad esempio, che



consente a questo uccello di mimetizzarsi meglio in base alla presenza o all'assenza del manto nevoso, è sincronizzata al ciclo di durata del giorno e della notte (fotoperiodo). È molto probabile che la diminuzione della durata della copertura nevosa avrà luogo più rapidamente della capacità adattativa di questa specie, che probabilmente si troverà fuori sincrono con il suo habitat e più vulnerabile ai predatori. Un altro esempio riguarda lo stambecco e il camoscio. La qualità del foraggio è un fattore più importante della quantità (Garel et al., 2011), ma in primavera, la crescita delle piante e la data di fioritura non sono più sincronizzate con quella delle nascite dei giovani. Le madri si trovano ad avere a disposizione risorse foraggere di minor qualità e latte più povero per lo sviluppo dei giovani. In estate, la siccità riduce le risorse disponibili per lo stambecco e le femmine non sono in condizioni fisiche ottimali per il periodo di allevamento e la gestazione. Uno studio condotto sul massiccio di Belledonne ha osservato un calo del successo riproduttivo durante le stagioni calde. Un altro studio condotto nel Canton Ticino e nel nord del Piemonte, ha dimostrato che la popolazione di camosci e la loro massa corporea si sono fortemente ridotte dopo l'ondata di caldo del 2003. Il susseguirsi di primavera e estati anormalmente calde hanno successivamente impedito loro di tornare alle condizioni fisiche iniziali (Rughetti e Festa-Bianchet, 2012). Nel massiccio dei Bauges, i modelli predittivi stimano una riduzione del 20% del tasso di occupazione del camoscio entro il 2100 (Thuiller et al., 2018)

Infine, la semplificazione della struttura spaziale e della composizione specifica degli ecosistemi e la riduzione dell'estensione degli ambienti freddi potrebbero portare alla **perdita di habitat** per tutte le specie che necessitano di ambienti freddi per il loro sviluppo e riproduzione. Tra questi, possiamo anche menzionare la pernice bianca, che è attualmente molto presente nel massiccio del Monte Bianco. Sebbene il riscaldamento in primavera abbia un effetto positivo sulla sua riproduzione (Martin e Wiebe, 2004), i cambiamenti climatici rischiano di eliminare il 60% del suo habitat favorevole entro il 2050 e oltre il 90% entro la fine del secolo. (Figura 3.16, Reverman et al. 2012).

### Habitat du lagopède alpin

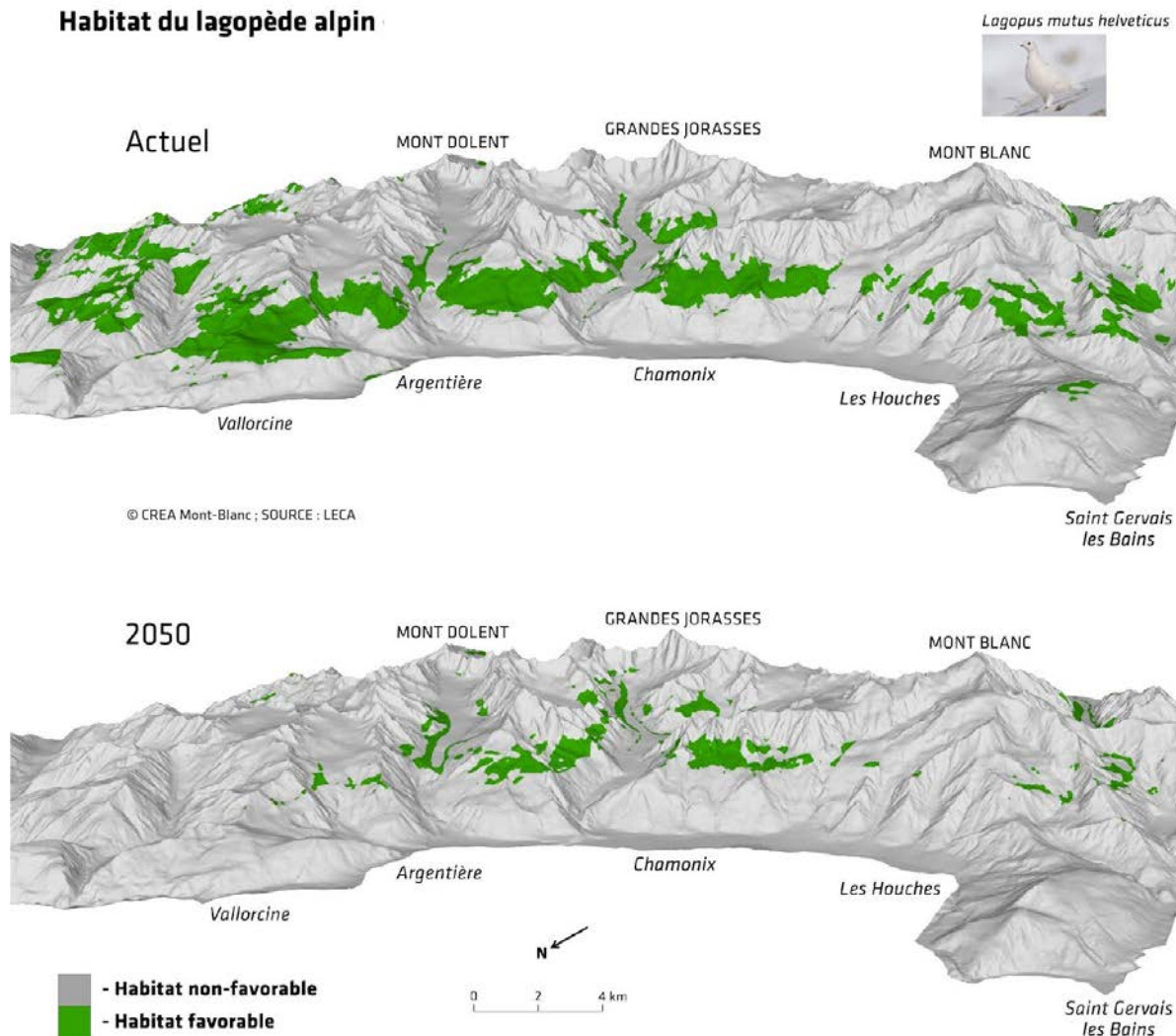


Figure 3.16. riduzione dell'estensione di habitat favorevole alla pernice bianca (*Lagopus mutus helveticus*) secondo lo scenario RCP 8.5.

#### Impatti sulle strategie di gestione e di conservazione

La continua evoluzione degli habitat del massiccio del Monte Bianco e delle specie ospitate implica la necessità di adattarne le strategie di conservazione. Diversi elementi devono essere presi in considerazione:

- ecosistemi in buono stato di conservazione sono una delle chiavi per l'adattamento di molti altri settori (foreste, agricoltura, turismo, rischi naturali). Oltre alla conservazione del patrimonio paesaggistico-naturalistico, sono spesso il fondamento per l'applicazione e lo sviluppo di azioni di adattamento "basate sulla natura" (**nature based solutions**)
- **la biodiversità nelle Alpi come a livello globale, sta attualmente subendo un'erosione senza precedenti**, non solo a causa dei cambiamenti climatici ma anche di altre pressioni antropiche. Le strategie di conservazione dovranno necessariamente tener conto simultaneamente non solo delle pressioni legate ai cambiamenti climatici, ma anche di quelle legate ad altri disturbi come la frequentazione umana o la frammentazione degli habitat
- la complessità del funzionamento degli ecosistemi e la presenza di effetti a catena e feedback richiede una **gestione adattativa, molto reattiva e sostenuta da un sistema di monitoraggio appropriato**
-

- le aree protette sono aree naturali di protezione e tutela per le specie che stanno affrontando cambiamenti che avvengono ad una velocità spesso maggiore delle loro capacità di adattamento. Per molte specie sono l'unica possibilità di adattamento. La perdita di habitat può portare ad una riduzione delle dimensioni e della resilienza (in termini di diversità genetica e funzionale) di popolazioni di specie specializzate, rendendole ancora più vulnerabili. Una grande sfida è quindi la **conservazione di ambienti naturali diversificati** al fine di garantire una varietà di soluzioni e spazi di adattamento per le specie alpine.

Da questa prospettiva, possono emergere alcune linee guida per l'adattamento delle strategie di conservazione:

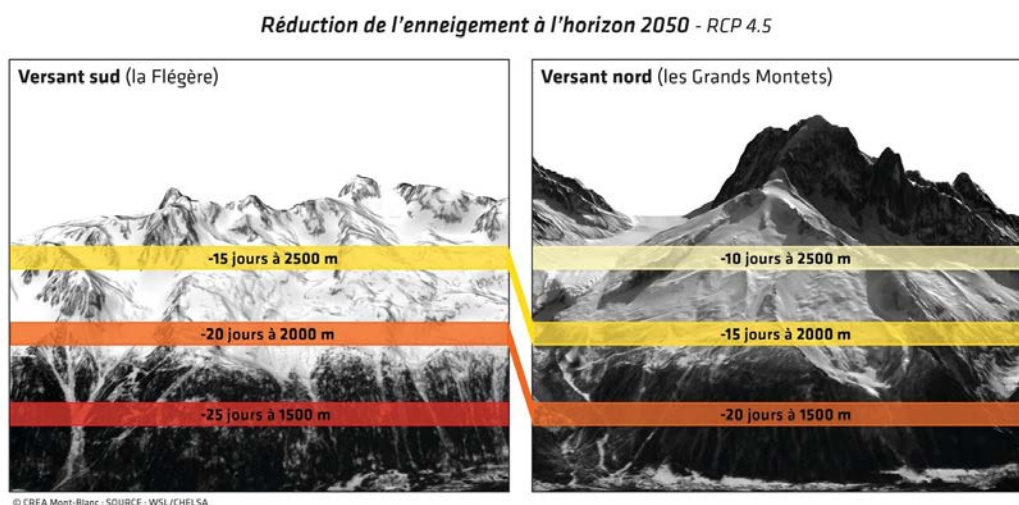
- L'alta quota rimarrà un'area rifugio per piante e animali alpini. Il territorio del Monte Bianco avrà quindi una responsabilità sempre più importante per la conservazione di queste specie ed ecosistemi. Oggi, queste aree di alta montagna sono relativamente poco antropizzate, rendendole rifugi naturali per flora e fauna. Con i cambiamenti climatici, la pressione su queste aree, che attualmente sono poco frequentate o utilizzate dall'uomo, potrebbe aumentare. **Le sfide della gestione e della protezione della biodiversità si allargheranno quindi, verso altitudini più elevate e ad aree oggi senza molte necessità di gestione**, come zone di ritiro glaciale o zone umide di altitudine.
- **Le misure di gestione e persino la delimitazione delle aree protette dovranno adattarsi in funzione dell'evoluzione della distribuzione di specie e habitat.** I corridoi ecologici o le zone cuscinetto attorno alle aree protette dovranno accompagnare l'evoluzione della distribuzione delle popolazioni animali e vegetali per consentire la loro migrazione in quota o verso i micro-rilievi che favoriscono il loro sviluppo. A seconda delle scelte di gestione effettuate, questi spazi di transizione dovranno cercare un sottile equilibrio tra la protezione delle aree di rifugio per specifiche specie alpine e la limitazione dell'arrivo di specie termofile o invasive.
- **L'impatto a breve e a lungo termine sulla biodiversità e sui servizi ecosistemici deve essere pienamente preso in considerazione nelle decisioni di pianificazione territoriale e nella gestione dei flussi turistici.** Questa frequentazione tenderà ad aumentare e a prolungarsi a stagioni che oggi non sono molto turistiche, probabilmente con conseguente domanda di infrastrutture (percorsi, edifici ...) e aumento dei disturbi. Il periodo compreso tra la fine della primavera e all'inizio dell'estate dovrebbe essere osservato con particolare attenzione poiché gli animali, indeboliti dall'inverno e in piena riproduzione, sono particolarmente sensibili ai disturbi.
- **Promuovere la diversità degli ambienti naturali preferendo soluzioni basate sulla natura**, ad esempio un'attività pastorale estensiva adattata nello spazio e nel tempo al cambiamento delle condizioni della neve e del clima estivo (siccità e ondate di calore in particolare) per preservare i servizi ecosistemici degli ambienti agropastorali attuali così come una particolare attenzione nella progettazione (scelta delle specie) e realizzazione delle aree verdi finalizzate alla creazione di isole di fresco nelle zone urbane.

### 3.5 Turismo

Il turismo rappresenta uno dei settori economici più importanti del EMB (ovvero il 6-8% del PIL regionale in Valle d'Aosta nel periodo 2013-2017, considerando solo i settori ricettivo / alberghiero e della ristorazione, fonte : Osservatorio economico e sociale della Regione autonoma della Valle d'Aosta, 2018 - o addirittura il 30% dell'occupazione nel settore privato per l'anno 2015 sul versante francese del EMB, fonte: Savoie Mont-Blanc Tourisme Zoom Territoire, 2017). Il turismo invernale è basato sulla pratica dello sci, un'attività che è direttamente influenzata dalle condizioni climatiche sia per la durata del manto nevoso naturale che per la gestione delle stazioni sciistiche (produzione di neve artificiale). Il turismo estivo potrebbe beneficiare delle condizioni di temperatura più favorevoli rispetto a quelle della pianura promuovendosi come “oasi di frescura”, soprattutto in media montagna. In un contesto di alta montagna, invece, il riscaldamento porterà ad un progressivo deterioramento delle condizioni necessarie per la pratica estiva dell'alpinismo.

#### *Turismo invernale*

Dipendendo direttamente dalla temperatura dell'aria e dalla copertura nevosa, la pratica dello sci rappresenta un settore particolarmente vulnerabile ai cambiamenti climatici. Nel massiccio del Monte Bianco, **il periodo nevoso (con neve al suolo) è diminuito di 40 giorni tra i 1.500 ed i 2.500 m rispetto al 1970** (Klein et al., 2016). **Entro il 2050 è prevista un'ulteriore riduzione dal 40% al 90% delle nevicate.** A 1500 m, la durata del periodo nevoso sarà ulteriormente ridotta di altri 40 giorni (Verfaillie et al., 2018), con una riduzione maggiore in primavera rispetto all'autunno (Klein et al., 2016). La riduzione sarà meno forte (dal 20% al 40%) tra i 1500 ed i 2500 m di altitudine e più contenuta sopra i 2500 m (tra il 5 e il 10%; Frei et al., 2018; Marty et al., 2017 ). La Figura 3.17 riassume la riduzione della copertura nevosa prevista per due pendii nella valle di Chamonix, la Figura 3.18 mostra una proiezione al 2050 della durata della copertura nevosa naturale alla scala del EMB, secondo lo scenario intermedio (RCP 4.5). Si prevede la scomparsa del manto nevoso dai fondovalle ed una riduzione di circa 20 giorni di innevamento in media montagna entro il 2050 (Figura 3.18).



**Figura 3.17. Riduzione dell'innevamento (nb. giorni di neve al suolo) sui versanti sud e nord all'orizzonte 2050**, nella valle di Chamonix. La riduzione più marcata si avrà sui versanti sud al di sotto dei 2000 m. Lo sfondo è stato creato da un'immagine del satellite Sentinel-2 del febbraio 2016.

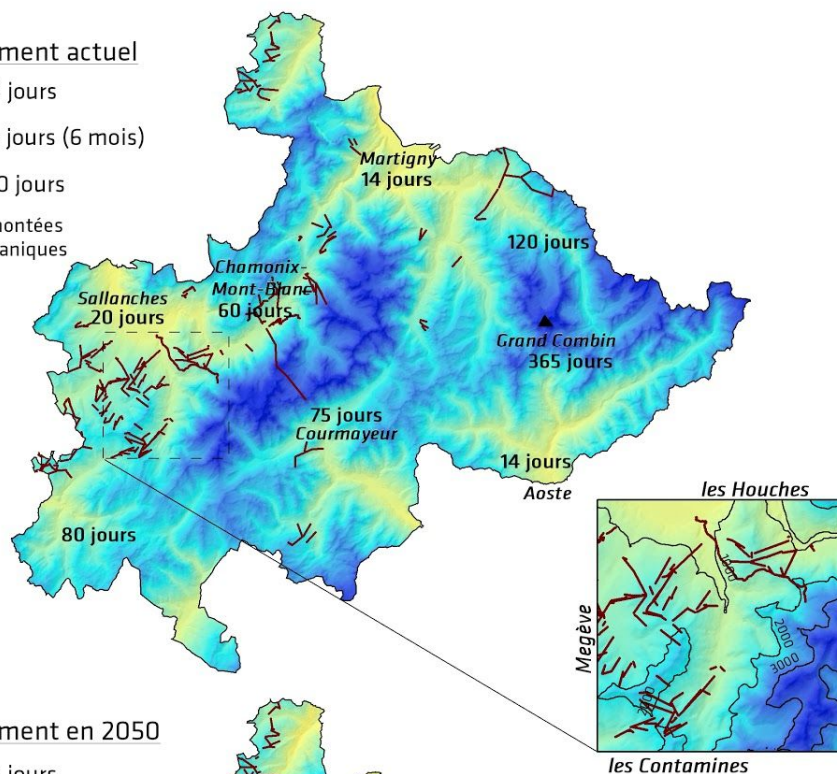


## DUREE DE L'ENNEIGEMENT (actuel et 2050 - RCP 4.5)

### Enneigement actuel



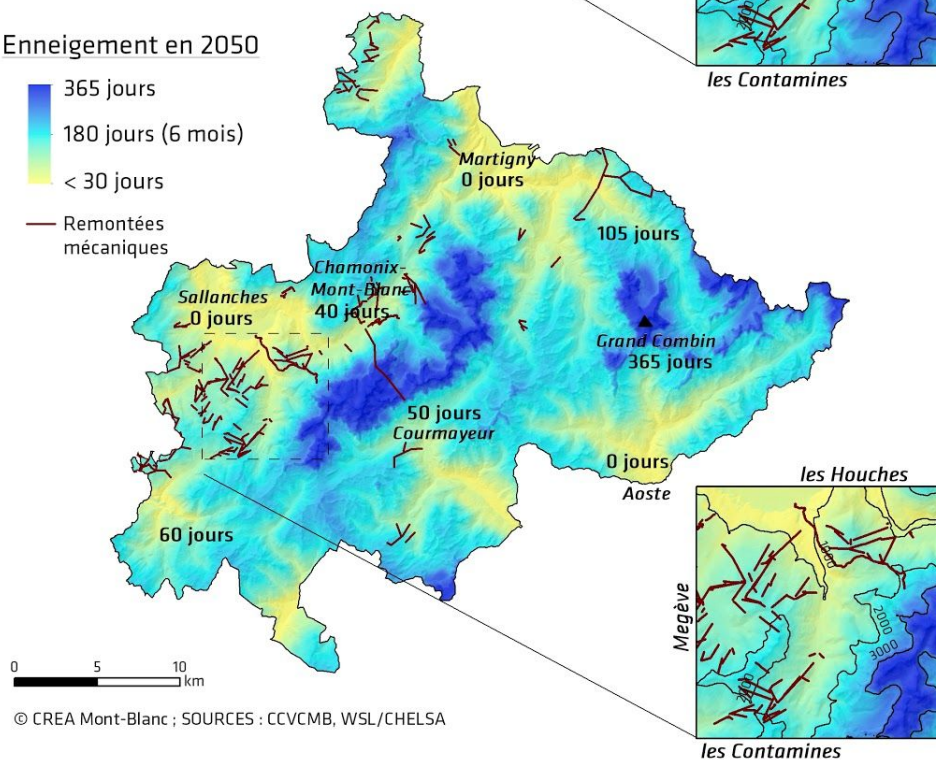
Remontées mécaniques



### Enneigement en 2050



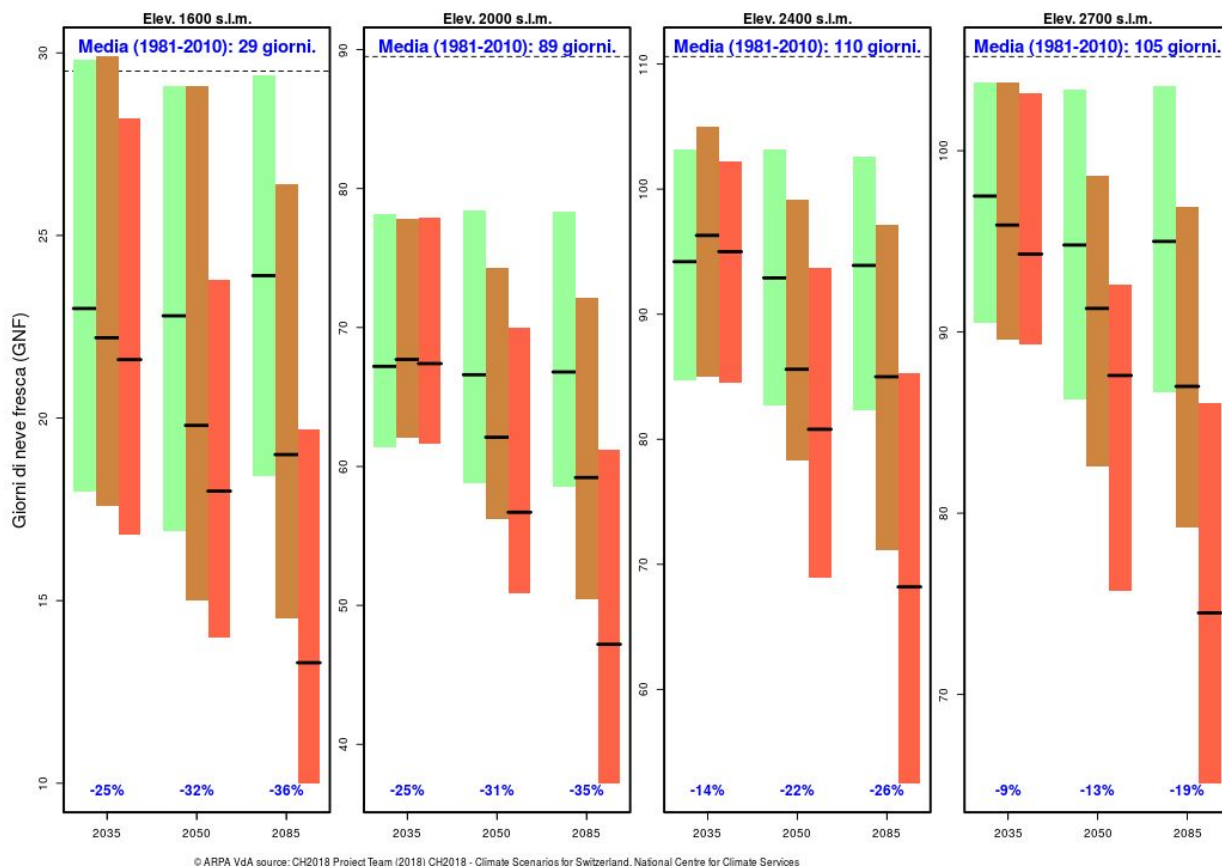
Remontées mécaniques



**Figura 3.18. Evoluzione della durata dell'innevamento (nb. giorni di neve al suolo) nel EMB all'orizzonte 2050.** Si prevede la totale scomparsa della neve dai fondovalle ed una riduzione generale della durata dell'innevamento fino a 3000 m, anche nelle stazioni sciistiche del EMB (nota: la localizzazione delle stazioni sciistiche in Italia ed in Svizzera è approssimativa e non esaustiva).

La riduzione dell'innevamento è causato dall'aumento delle temperature invernali (che favoriscono le precipitazioni sotto forma di pioggia piuttosto che di neve) e dall'aumento delle temperature primaverili che causano una fusione accelerata del manto nevoso. La Figura 3.19 mostra la riduzione del numero di giorni con precipitazioni sotto forma di neve a diverse altitudini. A 1600 m, è prevista una riduzione del 25% dal 2030 e del 30-35% entro il 2050. Una riduzione analoga è prevista a 2000 m, mentre la riduzione

a 2400 e 2700 m è inferiore: a queste altitudini si prevede una riduzione rispettivamente del 9 e 16% nel 2030.



**Figura 3.19. Variazione dei giorni con precipitazioni nevose (giorni di neve fresca), per quattro fasce di quota.** Il colore delle barre rappresenta i tre scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10mo et 90mo percentile), dovuta ai differenti modelli climatici utilizzati. © ARPA VdA, fonte CH2018.

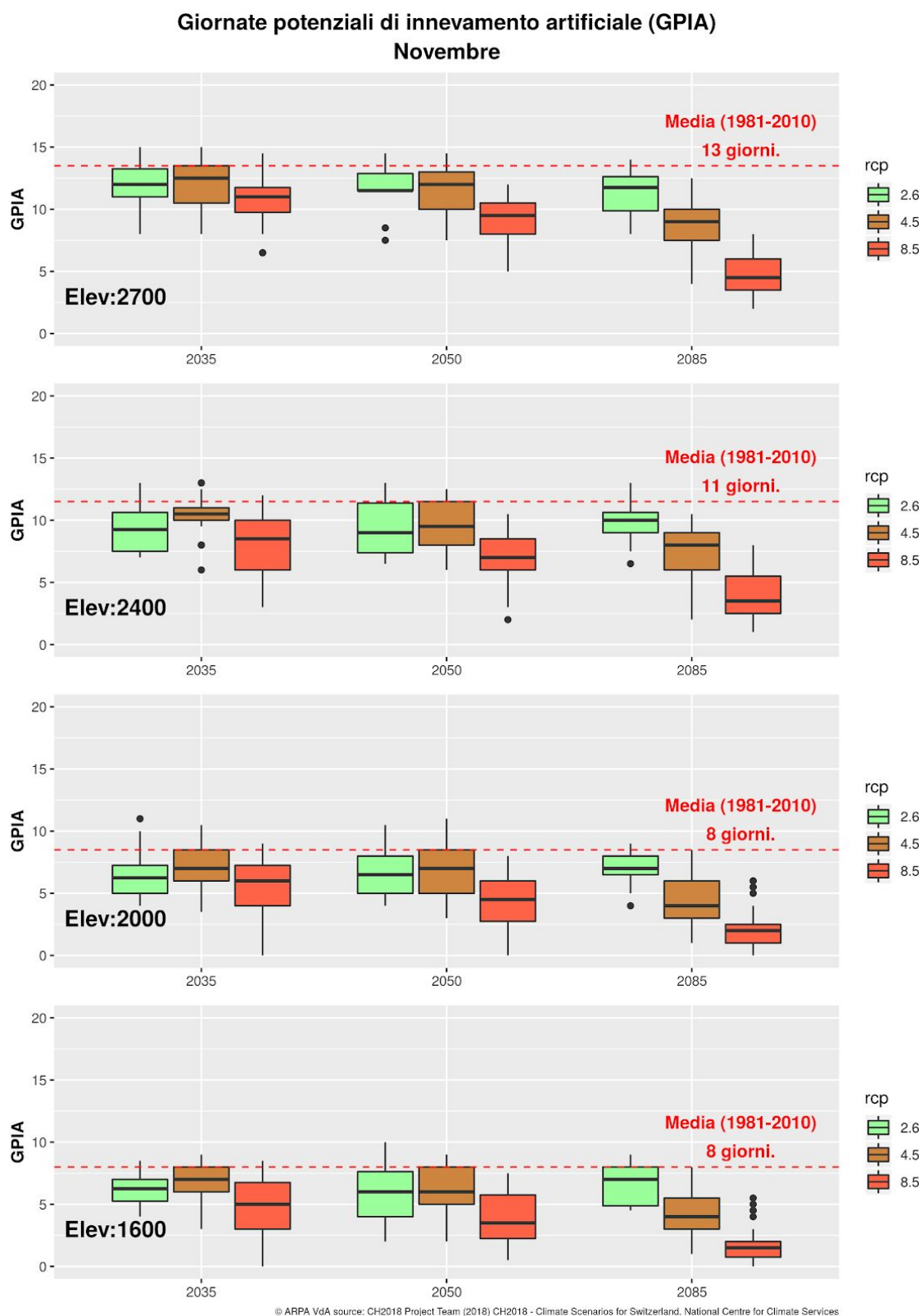
Per garantire un innevamento sufficiente alla pratica dello sci e ridurre le perdite economiche, le stazioni sciistiche possono adattarsi alle attuali condizioni climatiche ed ai cambiamenti futuri adottando diverse pratiche di gestione (innervamento artificiale, preparazione delle piste,...). L'efficacia a lungo termine di questi metodi dipende da diversi fattori quali gli scenari di temperatura e umidità, disponibilità di acqua ed energia e capacità di pagare gli investimenti e i costi operativi (Spandre et al., 2019a, Spandre et al., 2019b). **La disponibilità di acqua sarà un fattore importante da considerare**, dato l'atteso calo dei deflussi in autunno (Figura 3.2) che ridurrà la possibilità di deviare e immagazzinare acqua allo scopo di produrre neve artificiale. Dal momento in cui queste pratiche di gestione saranno implementate in modo ecologicamente ed economicamente sostenibile, gli effetti della riduzione della copertura nevosa potranno essere mitigati.

**Nell'immediato futuro (2035, 2050) le stazioni sciistiche poste al di sotto dei 2000 m subiranno le perdite economiche più gravi. Per le stazioni oltre i 2000 m i rischi previsti dipenderanno molto dalla configurazione topografica (esposizione) e dalle condizioni locali (di temperatura ed umidità) necessarie per attuare con successo le pratiche di gestione della neve.** La Figura 3.20 mostra la riduzione del numero di giorni durante i quali vengono raggiunte le condizioni termiche necessarie per la produzione di neve artificiale. Tecnicamente, la produzione di neve artificiale può essere effettuata solo ad una temperatura di bulbo umido (temperatura dell'aria satura di acqua) pari o inferiore a -2°C, che



corrisponde ad una temperatura secca (normale) tra -3 e -7°C a seconda dell'umidità. La produzione ottimale si ottiene tuttavia con temperature di bulbo umido comprese tra -5 e -8°C. (Spandre et al., 2019a). Il grafico mostra il solo mese di novembre, che è cruciale per la gestione delle stazioni, poiché garantisce l'apertura delle piste per l'inizio di dicembre.

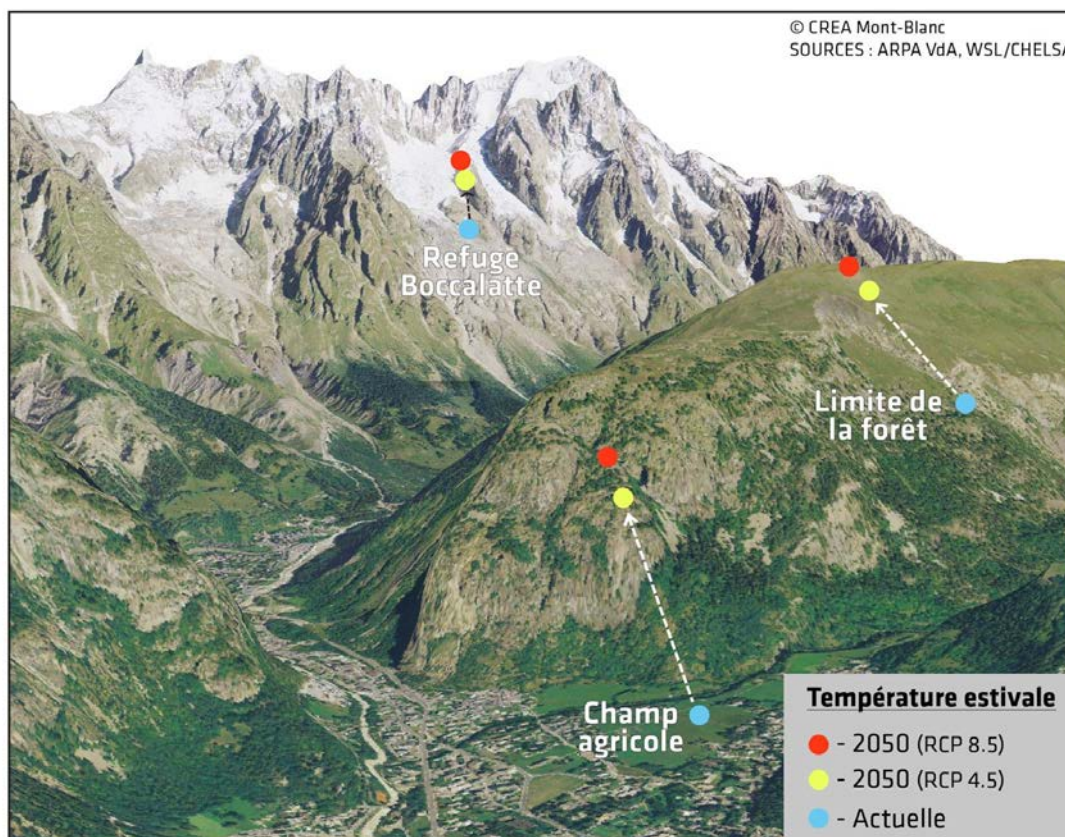
Nel 2035, a 1600 e 2000 m, si prevede che **i giorni potenziali di innevamento artificiale per il mese di novembre (GPIA)** diminuiranno da 8 a circa 5 - 7 giorni. Questa riduzione sarà accentuata nel 2050 (da 3 a 6 GPIA a 1600 m e da 4 a 7 a 2000 m) per diventare a fine secolo da 2 a 6 GPIA. Nell'immediato futuro (2035-2050) lo scenario più pessimistico prevede 6 GPIA a 2400 m (2050) e 9 GPIA a 2700 m. Alla fine del secolo la riduzione sarà molto marcata anche in quota, secondo lo scenario pessimistico (RCP8.5): 3 GPIA a 2400 m e 4 GPIA a 2700 m. Mentre nello scenario che prevede forti azioni di mitigazione (RCP2.6) la riduzione di GPIA in altitudine sarà minima. Il calo della redditività delle località a bassa quota nelle Alpi potrebbe a medio termine favorire le località del EMB, che si trovano ad altitudini mediamente più elevate (ad esempio, circa 2000 m di altitudine minima media delle piste della Valle d'Aosta, Rapporto regionale sugli impianti di risalita del 2018) e che potrebbero recuperare quote di mercato (CH2014-Impacts, 2014). **In conclusione, dal punto di vista delle temperature, le strategie di adattamento delle stazioni sciistiche per l'innervamento artificiale saranno meno efficaci nell'immediato futuro (2035-2050) al di sotto dei 2000 m ed i rischi aumenteranno considerevolmente a lungo termine (fine del secolo) anche sopra i 2000 m.**



**Figura 3.20. Variazione dei giorni potenziali di innevamento artificiale (GPIA) nel mese di novembre a diverse quote.** Il colore delle barre rappresenta i tre scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10mo et 90mo percentile), dovuta ai differenti modelli climatici utilizzati. La linea rossa orizzontale rappresenta l'attuale livello di riferimento. Il numero di giorni potenziali di innevamento artificiale è stato definito utilizzando una soglia giornaliera per la temperatura di bulbo umido pari a  $-8^{\circ}\text{C}$ .

### *Turismo estivo e fuori stagione*

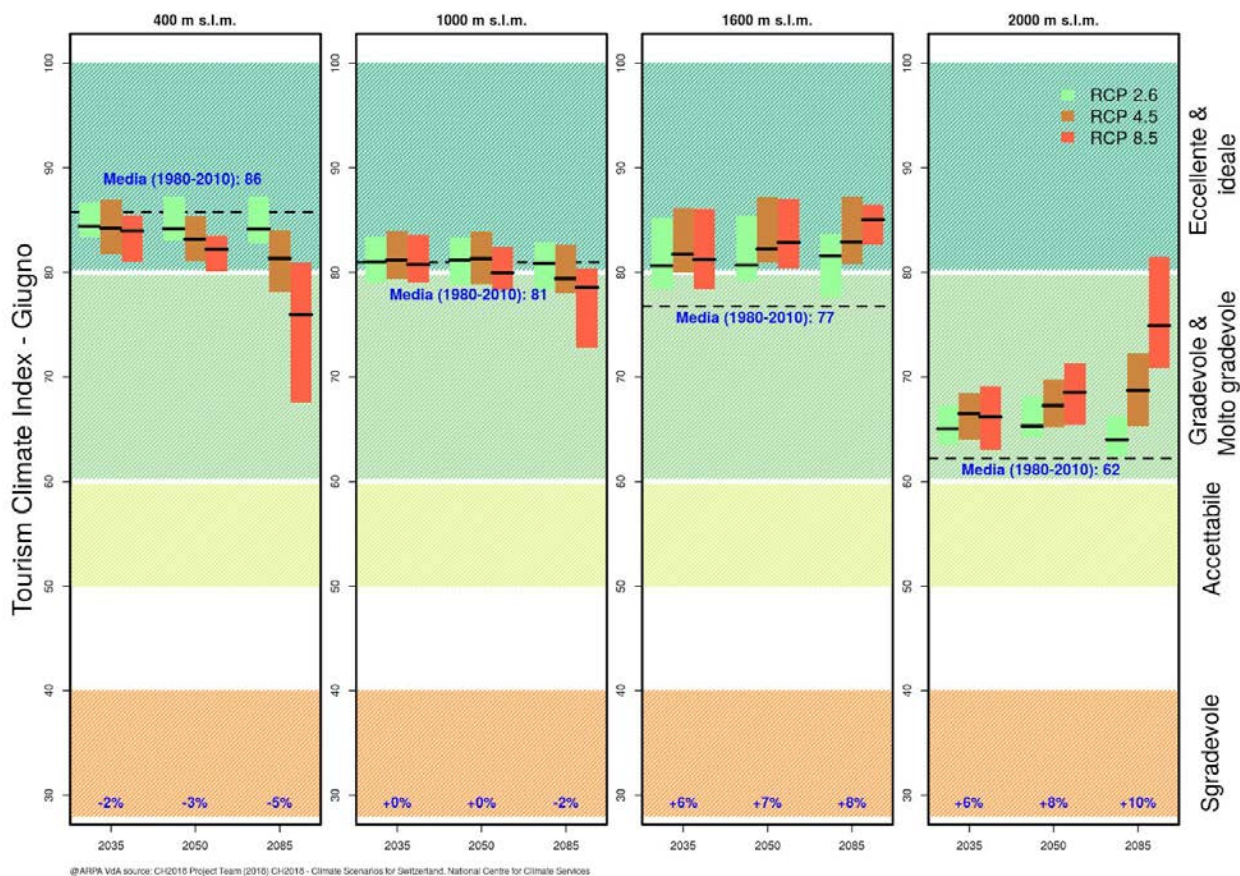
Con l'aumentare delle temperature è probabile che nelle zone di montagna si generi un afflusso di turisti in fuga dalle ondate di calore delle pianure e delle città (Bourdeau, 2009). La Figura 3.21 illustra il ruolo giocato dall'altitudine nel concetto dell'oasi di frescura: la montagna offre infatti la possibilità di trovare le attuali condizioni climatiche salendo in quota. Tuttavia, questa maggiore frequentazione della montagna porterà a problemi di pianificazione ed uso del suolo nonché all'adeguamento dell'offerta turistica, senza dimenticare che anche gli ambienti ad alta quota dovranno affrontare sfide per adattarsi ai cambiamenti climatici, come descritto in questo rapporto.



**Figura 3.21. Oasi di frescura estiva.** Il turismo estivo del EMB beneficerà nel prossimo futuro di un afflusso di turisti in fuga dalle ondate di calore di pianure e città, poiché le gradevoli condizioni di temperatura attuali si troveranno semplicemente a quote più elevate.

Condizioni estive più prolungate favoriranno il turismo anche durante i periodi attualmente considerati "fuori stagione" come la primavera e l'autunno (CH2014-Impacts, 2014). L'insieme dei parametri meteorologici (temperatura, vento, radiazione solare, umidità) che determinano il comfort climatico percepito dall'uomo per la realizzazione di attività turistiche nella natura, possono essere sintetizzati utilizzando un indice di comfort come il **Tourism Climate Index** (TCI, Mieczkowski, 1985). Questo indice definisce e quantifica delle categorie di comfort (eccellente, piacevole, ecc.). La Figura 3.22 mostra che per il mese di giugno il riscaldamento comporterà una riduzione del comfort climatico nella parte inferiore della valle, a 1000 m le variazioni di comfort saranno limitate, mentre a 1600 e 2000 m aumenteranno sensibilmente le giornate considerate piacevoli o eccellenti.



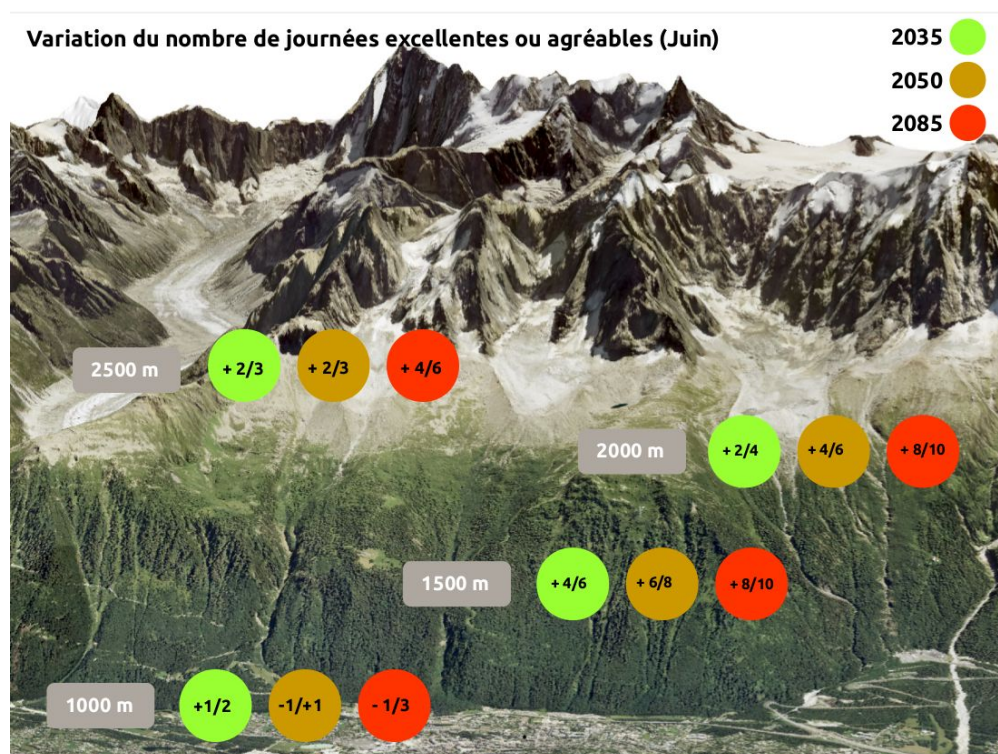


**Figura 3.22. Variazione del Tourism Climate Index (TCI) o comfort climatico nel mese di giugno**, a quattro fasce di quota. Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari climatici. L'altezza delle barre rappresenta l'incertezza (10° e 90° percentile), tenendo conto dei diversi modelli climatici considerati. Le linee nere orizzontali indicano il valore dell'indice nel periodo 1980-2010. Le aree colorate rappresentano le diverse categorie di comfort climatico.

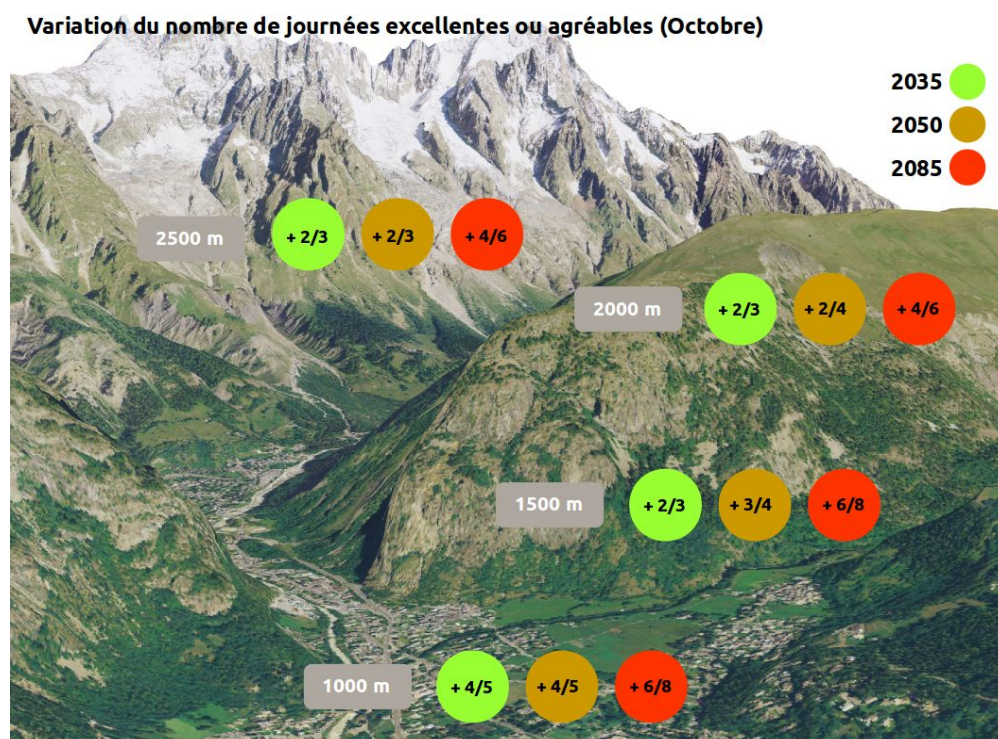
L'indice TCI di giugno può essere sintetizzato analizzando la **variazione del numero di giorni gradevoli o eccellenti** rispetto all'attuale periodo di riferimento. La Figura 3.23 mostra che nel prossimo futuro (2035-2050) il numero di giorni eccellenti di giugno dovrebbe aumentare da 4 a 8 giorni tra 1500 e 2000 m di altitudine e da 8 a 10 entro fine secolo. Questo aumento sarà meno forte a 2500 m: da +2 a 3 giorni gradevoli nel 2035-2050 e da +4 a 6 per la fine del secolo. A 1000 m le modifiche saranno trascurabili. Se consideriamo il mese di **ottobre** (Figura 3.24), emergeranno **grandi opportunità per estendere il periodo "estivo"**: da +2 a 5 giorni eccellenti a 1000 e 1500 m nel prossimo futuro (2035-2050) e da +6 a 8 giorni entro fine secolo; a 2000 e 2500 m, da +2 a 4 giorni gradevoli nel prossimo futuro (2035-2050) e da +4 a 6 giorni entro fine secolo.

In conclusione, **nel prossimo futuro (2035-2050) è previsto a tutte le quote un aumento di quasi una settimana nel numero di giornate con condizioni climatiche gradevoli o eccellenti per i mesi di giugno e ottobre**: lo sviluppo turistico nel periodo fuori stagione costituirà, potenzialmente, una strategia di adattamento per il settore turistico, in particolare per le località alle quote più basse che saranno impattate negativamente dalla riduzione della copertura nevosa. Ne consegue che le attività proposte e le infrastrutture dovranno adattarsi alle nuove condizioni ambientali per poter sfruttare appieno queste opportunità.





**Figura 3.23. Evoluzione del numero di giorni in condizioni climatiche eccellenti o gradevoli a diverse quote nel mese di giugno.** I valori nei cerchi indicano l'aumento del numero di giorni con condizioni meteorologiche gradevoli o eccellenti per diverse altitudini (1000, 1500 e 2000 e 2500 m), per il mese di giugno. Le condizioni gradevoli o eccellenti sono definite sulla base del Tourism Climate Index (TCI) (Mieczkowski, 1985).



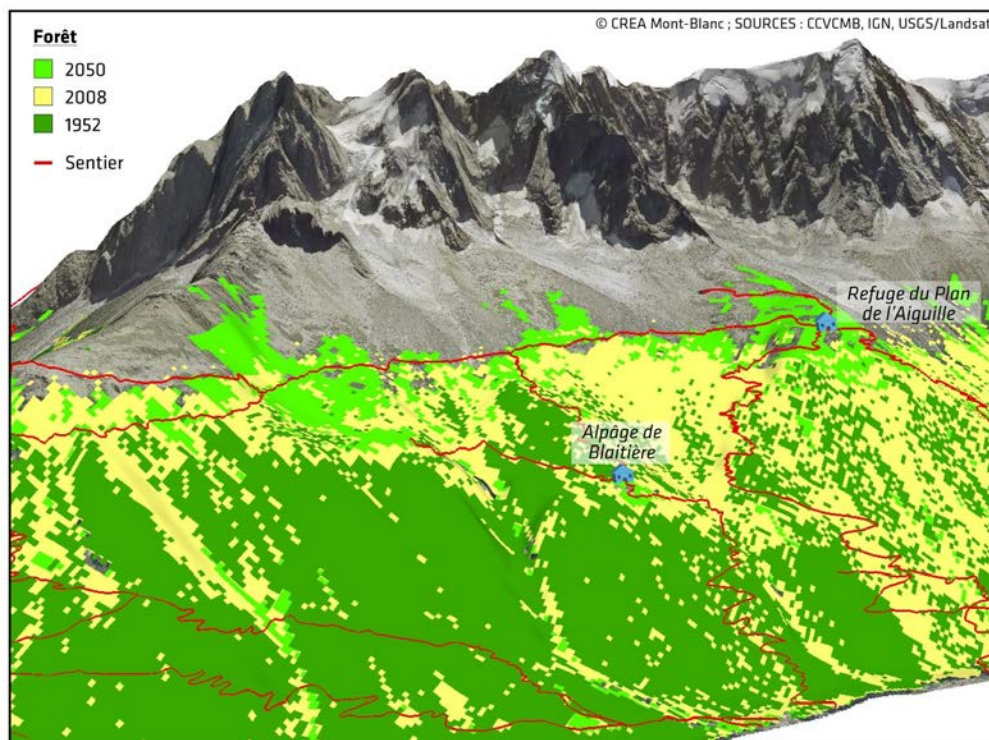
**Figura 3.24. Evoluzione del numero di giorni in condizioni climatiche eccellenti o gradevoli a diverse quote nel mese di ottobre.** I valori nei cerchi indicano l'aumento del numero di giorni con condizioni meteorologiche gradevoli o eccellenti per diverse altitudini (1000, 1500 e 2000 e 2500 m), per il mese di giugno. Le condizioni gradevoli o eccellenti sono definite sulla base del Tourism Climate Index (TCI) (Mieczkowski, 1985).



Tuttavia, si deve considerare che l'attrazione turistica della montagna probabilmente cambierà da un lato per l'aumento della sua pericolosità legata ai rischi naturali (cfr. 3.6) e dall'altro per la progressiva **modifica dei paesaggi emblematici di media ed alta montagna che attualmente contribuiscono alla creazione dell'immagine della montagna.**

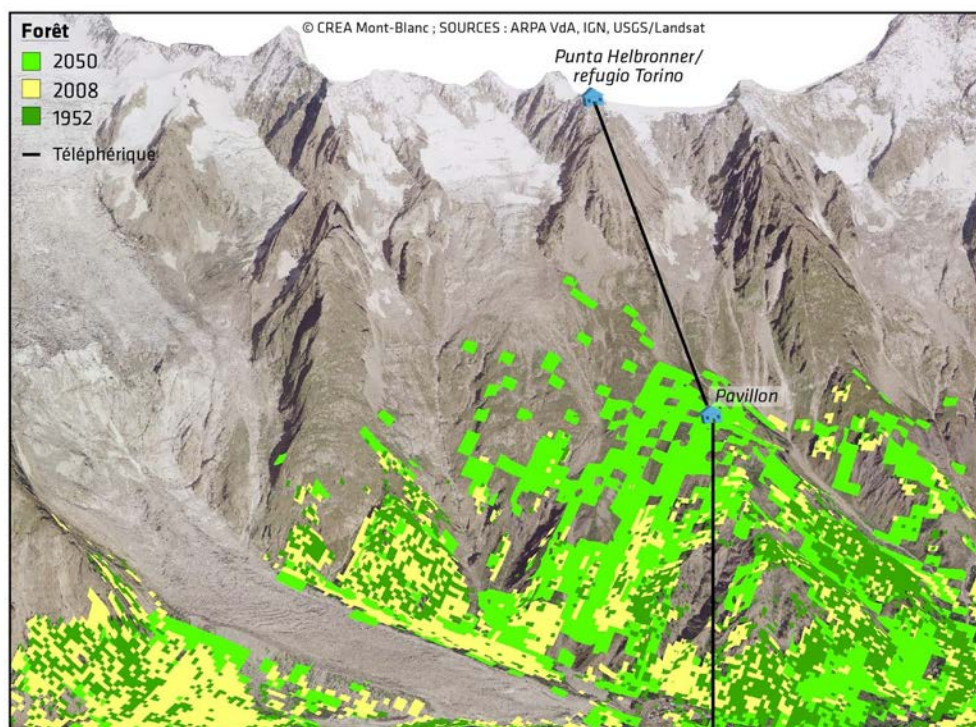
In alta montagna, si tratta principalmente della fusione dei ghiacciai e del loro aspetto "grigio" durante il periodo estivo. La colonizzazione delle morene da parte di foreste e altre piante potrebbe invece avere effetti positivi, stabilizzando e rendendo più attraenti i paesaggi post-glaciali.

In media montagna, a lungo termine, **l'ascesa del limite della vegetazione a quote più elevate ed i cambiamenti nella biodiversità influenzeranno anche i paesaggi ed il loro fascino visivo.** La risalita della foresta, in particolare, può interferire con le infrastrutture turistiche esistenti e modificare punti di osservazione che attualmente offrono una visuale libera e non ostruita dalla presenza di alberi. La Figura 3.25 mostra un esempio di questo processo sul pendio di Chamonix, indicando gli ambienti che molto probabilmente saranno colonizzati dalla foresta entro il 2050, vale a dire il rifugio Plan de l'Aiguille e il sentiero North Balcony. Sul lato Courmayeur (Figura 3.26), possiamo immaginare che nel prossimo futuro (2050), la stazione intermedia della Skyway al Pavillon sarà circondata da ambienti forestali. È quindi una questione di scelta del management lasciare che queste dinamiche seguano le loro traiettorie "naturali" o gestire determinati risvolti per limitare l'espansione della foresta.



**Figura 3.25. Evoluzione della copertura forestale tra il 1952 e il 2050 sul versante francese del massiccio del Monte Bianco (Plan de l'Aiguille).** Le zone gialle indicano il forte aumento e l'aumento della densità della foresta osservato tra gli anni '50 e il 2000 in relazione al riscaldamento globale ed al declino dell'agricoltura di montagna. Le aree verde chiaro indicano le aree che molto probabilmente saranno colonizzate dalla foresta entro il 2050, queste comprendono il rifugio Plan de l'Aiguille e il sentiero North Balcony.





**Figura 3.26. Evoluzione della copertura forestale tra il 1952 e il 2050 sul versante italiano del Monte Bianco sopra Courmayeur.** Le aree gialle indicano l'infittimento della foresta osservato tra gli anni '50 e '2000 in relazione al riscaldamento globale ed ai cambiamenti nell'uso del suolo. Le aree verde chiaro indicano gli ambienti che molto probabilmente saranno colonizzati dalla foresta entro il 2050, queste comprendono la stazione intermedia Skyway al Pavillon.

#### BOX 7: Cas d'étude du Glacier de Tortin



Il ghiacciaio Tortin in Svizzera, situato tra 2900 m e 3300 m sul livello del mare, ai piedi del Mont-Fort, è gestito da Télervier e NVrm (Téléenndaz) dal 1980. È il punto più alto del comprensorio sciistico denominato 4Vallées. L'area è attrezzata e facilmente accessibile con gli impianti di risalita dalle stazioni Verbier e Haute-Nendaz. Il ghiacciaio Tortin si riduce continuamente in superficie e spessore.

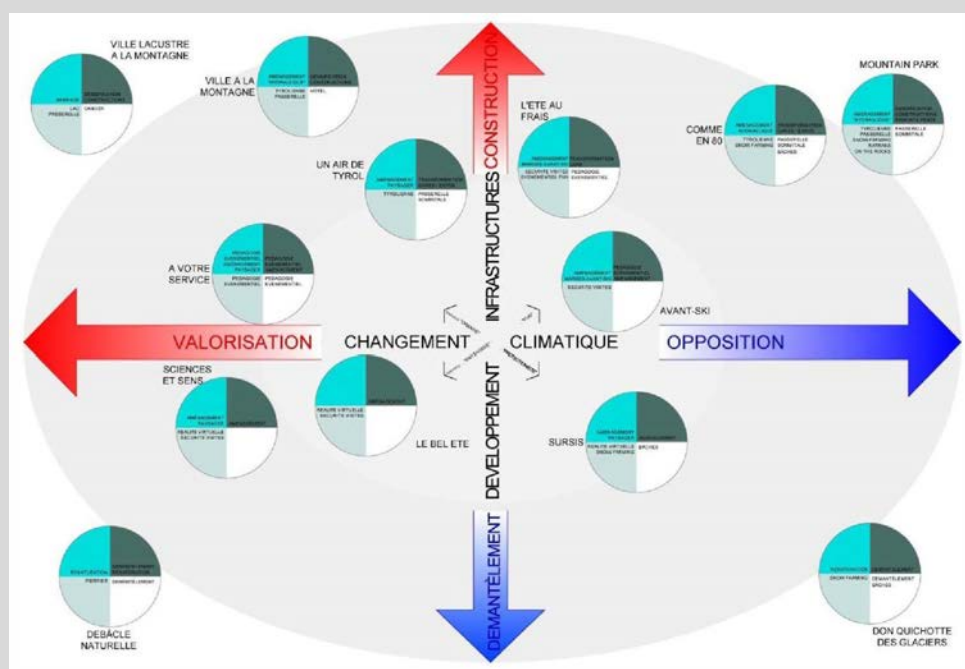
poichè non dispone più di una zona di accumulo sufficiente. Tuttavia, grazie all'alta quota e all'accessibilità, **lo sci invernale non è fondamentalmente messo in discussione**. Gli operatori si stanno adattando ai movimenti del ghiacciaio (crepacci) ed alle variazioni delle coperture detritiche (ghiaione / morene che sostituiscono il ghiaccio). A meno che non vi sia un grande cambiamento topografico, come la comparsa di barre rocciose o la massiccia destabilizzazione del permafrost, **l'attività invernale può ragionevolmente durare o addirittura essere rafforzata**, grazie a una posizione competitiva e favorevole.

**L'attività estiva**, invece, è rimessa in discussione. Lo sci estivo non è più possibile nello stato attuale. L'attrattiva dell'area è limitata con il bel tempo al panorama ed alle escursioni (limitate). Le aree a quote più basse sono più attraenti (varie) e costano meno per funzionare. Tuttavia, la parte alta del comprensorio è facilmente accessibile e può essere sfruttata meglio. I gestori degli impianti di risalita sono chiamati oggi a fare delle scelte importanti. Lo scopo del progetto pilota è di proporre una metodologia che consenta agli attori locali (operatori) di sviluppare strategie e prendere decisioni consapevoli e ponderate. I progetti che deriveranno da queste scelte saranno presentati alle autorità locali (comuni, cantoni) per la pianificazione e le autorizzazioni. Questa metodologia si sviluppa per fasi.

### Prima fase

Le varie idee e possibilità sono elencate in blocco, tutte, anche le più utopiche che non saranno mai realizzate ma che servono per inquadrare il ragionamento. Queste possibilità sono rappresentate graficamente lungo due assi: **smantellamento/costruzione** in relazione alle infrastrutture e **contrasto/sfruttamento** in relazione ai cambiamenti climatici.

Asse verticale: smantellamento / costruzione. Questa dimensione classifica le possibilità in base agli interventi sulle infrastrutture. Parte dall'abbandono, passa attraverso azioni leggere e misurate, fino a pesanti interventi. Asse orizzontale: contrasto/sfruttamento. Questa dimensione classifica le possibilità in funzione dell'atteggiamento adottato per affrontare il cambiamento climatico. Si va dal contrasto, ovvero il tentativo di mantenere una pratica a tutti i costi, allo sfruttamento delle nuove opportunità offerte dai cambiamenti climatici.



Questo primo strumento non fornisce alcun elemento per scegliere o criticare una azione. È semplicemente una panoramica che aiuta a collocare reciprocamente i progetti e gli atteggiamenti.

## Seconda fase

Oltre alle valutazioni "classiche" basate ad es. sulla valutazione del progetto rispetto all'ambiente montano, agli interessi economici, l'impatto ambientale, le opportunità sociali, ecc. si è deciso di includere esplicitamente anche la valutazione della resilienza in relazione alla ritirata del ghiacciaio. Questo per evitare atteggiamenti atti ad ignorare deliberatamente il problema. Si tratta anche di fornire un punto di vista critico rispetto alla tentazione di dilazione di scelte non più procrastinabili che ridurrebbe la strategia ad una mera copia della concorrenza. Questa analisi a più criteri definisce il secondo strumento ed è accompagnato da commenti ed esempi.

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
=	=	=		-		+	-

## Terza fase

Nella terza fase, **si effettua la scelta e si propone alle autorità**. È una scelta consapevole e giustificata che fa parte di una riflessione ampia e completa. Per il progetto pilota, la scelta spetta agli operatori. Il progetto non si limita a presentare una possibilità. Spiega perché queste sono le misure che sono state scelte rispetto ad altre. Definisce chiaramente un atteggiamento e lo assume nei confronti degli azionisti, delle autorità, della popolazione. Questa scelta sarà effettuata nella piena consapevolezza della sua sostenibilità e del rischio assunto.

Ufficio di progettazione : BFN architectes

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

Cantone del Vallese : Service de la mobilité (SDM)

Cantone del Vallese : Service de l'économie du tourisme et de l'innovation (SETI)

Autore della sintesi : Gilles Délèze SDM

## L'alpinismo e la sfida climatica

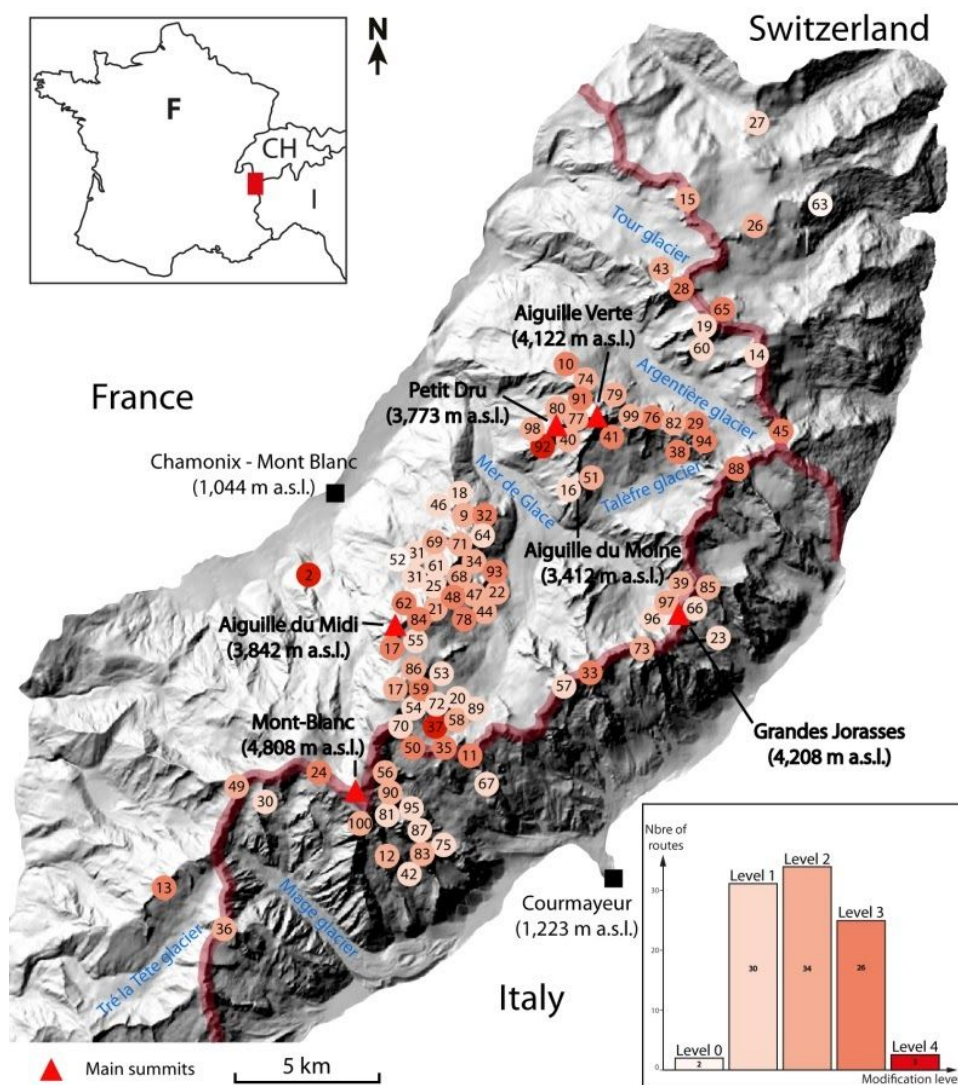
L'aumento delle temperature causa profondi cambiamenti in alta montagna, come il ritiro dei ghiacciai, la degradazione del permafrost e la riduzione della copertura nevosa. Questi fenomeni a loro volta portano ad un aumento della frequenza e del volume dei crolli di roccia (oltre 550 crolli con un volume maggiore di 100 m<sup>3</sup> tra il 2007 e il 2015 nel massiccio del Monte Bianco, Mourey e Ravanel, 2017), e una diminuzione delle aree coperte dal ghiaccio. **Tutte queste variazioni hanno un impatto diretto sui**

**percorsi di accesso ai rifugi. Nel massiccio del Mont-Blanc, l'81% dei gestori di rifugio afferma che la sicurezza della loro via d'accesso è cambiata negli ultimi 10 anni** (Mourey e Ravanel, 2017). Nel 96% dei casi, la via di accesso ha richiesto lavori di manutenzione straordinari, con costi talvolta significativi: € 130.000 per la costruzione di una passerella sul sentiero per il rifugio Conscribs (Mourey e Ravanel, 2017). L'accesso ai cinque rifugi dalla Mer de Glace (Chamonix) è minacciato, dal 1960 sono visibili profondi cambiamenti: destabilizzazione delle morene e comparsa di lastre rocciose a causa della fusione del ghiaccio. È stato necessario modificare il percorso diverse volte e ogni anno aggiungere delle scale per compensare la riduzione di spessore del ghiacciaio. Inoltre le morene rimangono instabili e sono soggette a frane, che possono coinvolgere i frequentatori. È il caso ad esempio della via di accesso al rifugio Shark, dove una frana nella morena laterale sinistra del ghiacciaio Tacul ha causato diversi infortuni nel 2002. (Mourey e Ravanel, 2017). Gli otto itinerari che portano ai rifugi nella zona della Mer de Glace studiate da Mourey e Ravanel (2017) hanno subito l'impatto della fusione dei ghiacciai e dell'erosione delle morene laterali, **sollevando la questione del futuro accesso ai rifugi e del loro utilizzo.**

**Gli ambienti di alta montagna, terreni di gioco per la pratica dell'alpinismo, sono soggetti a profonde modificazioni di fronte ai cambiamenti climatici** (Deline et al., 2012). Il risultato è un notevole cambiamento degli itinerari alpinistici e delle loro condizioni di frequentazione. Tuttavia, data la consapevolezza relativamente recente di questo problema, ad oggi sono state condotte ancora poche ricerche sul tema. In questo contesto, un lavoro di tesi di dottorato (J. Mourey) svolto nell'ambito del progetto AdaPT Mont-Blanc ha affrontato l'evoluzione delle condizioni della pratica dell'alpinismo in relazione agli effetti dei cambiamenti climatici, utilizzando un approccio multidisciplinare, strutturato attorno a tre principali linee di studio.

Per prima cosa, sono stati ricostruiti l'evoluzione degli itinerari di alta montagna e la loro condizione di frequentazione, su tutto il massiccio del Monte Bianco, con una logica da valle verso monte. I risultati mostrano, ad esempio, che gli itinerari di accesso ai rifugi di alta montagna, situati in media a un'altitudine di 3.020 m, sono principalmente colpite dalla fusione dei ghiacciai: il caso del bacino della Mer de Glace è un esempio emblematico (Mourey e Ravanel, 2017). Sebbene vengano effettuati lavori di adattamento per mantenere l'accessibilità a questi rifugi, i percorsi tendono a diventare più pericolosi e tecnicamente più difficili, il che mette in discussione il loro utilizzo. La situazione è simile per le vie alpinistiche vere e proprie che sono situate più in alto. Il confronto tra i 95 itinerari descritti da G. Rebuffat nella sua emblematica guida del 1973 *"Il massiccio del Monte Bianco. Le 100 più belle ascensioni"* con il loro stato attuale, ha mostrato che 26 vie si sono fortemente modificate e ormai raramente sono frequentate in estate e che 3 sono completamente scomparse (Mourey et al., 2019; Figura 3.27). Inoltre, si registra un generale aumento della loro difficoltà tecnica e della loro pericolosità, in relazione all'intensificarsi dei processi geomorfologici. Infine, i periodi di buone condizioni per la pratica dell'alpinismo tendono ad essere meno sistematici in estate con spostamenti casuali, a volte in primavera e talvolta in autunno.





**Figura 3.27. Ubicazione delle rotte studiate e loro livello di evoluzione (Mourey et al., 2019).** Il livello 0 corrisponde a nessuna modifica mentre il livello 4 corrisponde alla scomparsa dell'itinerario. I numeri corrispondono al numero dell'itinerario come indicato nella guida *Il massiccio del Monte Bianco: le 100 più belle ascensioni*, scritta da Gaston Rébuffat (Denoël, 1973).

Questa prima constatazione ha portato a domandarsi, con un confronto Francia / Italia (Salim et al., 2019), come le guide alpine, professionisti per eccellenza dell'alpinismo, siano influenzate dall'evolversi di questa situazione e come si adattino ad essa. Trenta interviste con guide alpine, funzionari sindacali, direttori di società / uffici guida e la distribuzione di un questionario hanno mostrato che, nel complesso, le guide hanno la flessibilità per diversificare la loro offerta in funzione delle condizioni e quindi di adattarsi e mantenere vitale la loro attività economica. Tuttavia, la percezione del problema è risultata molto eterogenea da una guida all'altra a seconda della clientela e della motivazione personale nel diversificare la gamma delle attività proposte.

Un itinerario del massiccio del Monte Bianco è oggetto di un'attenzione speciale: la via normale di salita del Monte Bianco (4.809 m), particolarmente colpita dai cambiamenti climatici. Per comprendere meglio la casistica degli incidenti legati alla caduta di rocce che interessa di frequente il settore del Goûter

(Mourey et al., 2018), è stato sviluppato un sistema di monitoraggio multidisciplinare (Figura 3.28). Esso aiuterà a comprendere meglio l'origine dei distacchi ed a valutare meglio la vulnerabilità degli alpinisti mediante una conteggio dei passaggi. I primi risultati hanno permesso di identificare comportamenti non congrui al rischio locale. È quindi possibile proporre strategie di adattamento e prevenzione.

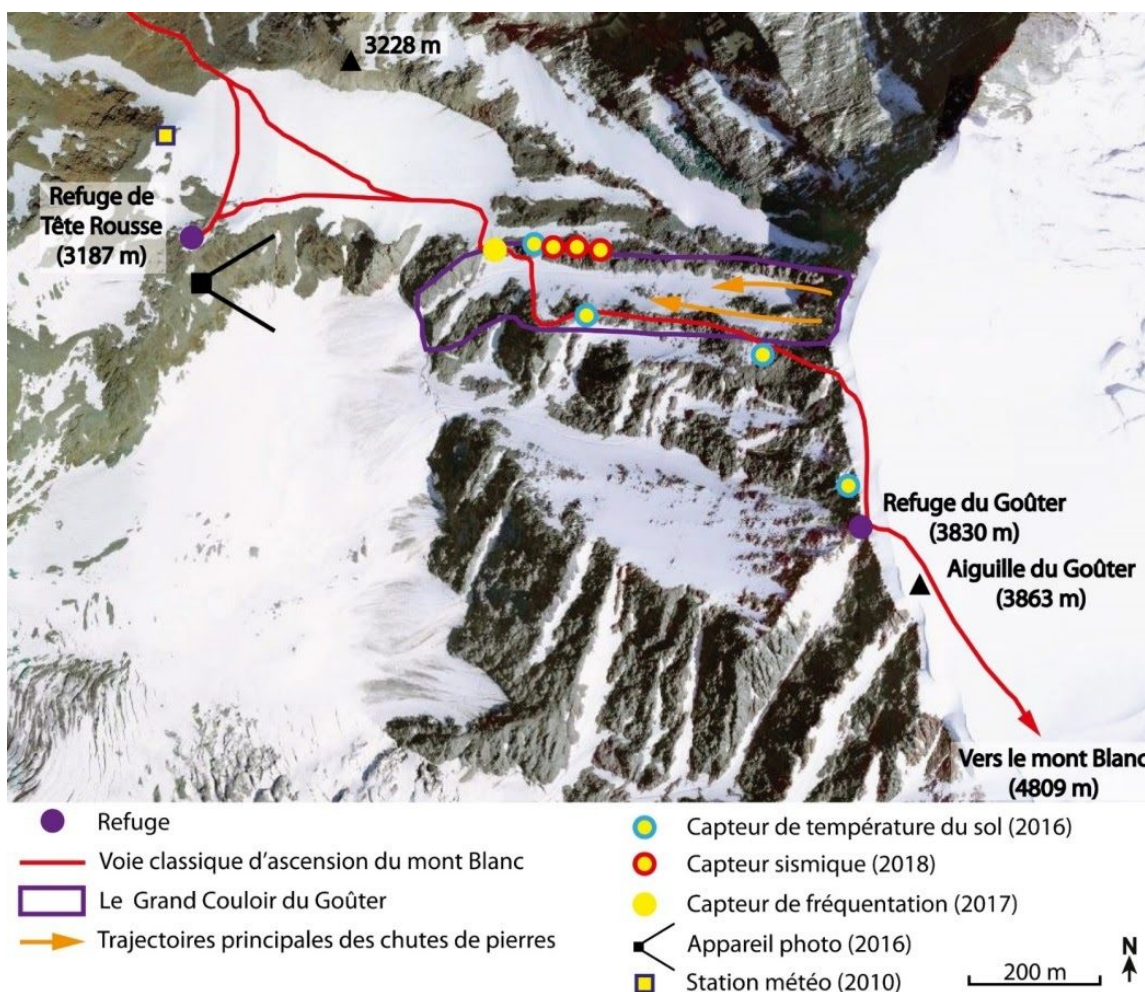


Figura 3.28. Sistema di monitoraggio multidisciplinare istituito sulla via normale di salita al Monte Bianco.

#### Quale futuro per il turismo glaciale nelle Alpi?

Anche se il massiccio del Monte Bianco fu una delle prime aree interessate dal turismo glaciale, in cui si sviluppò nel 1741, ancora oggi rimane un territorio eccezionale per coloro che desiderano osservare o calpestare il ghiaccio. È considerato un sito turistico glaciale qualsiasi luogo avente come principale elemento di attrazione un ghiacciaio, le forme geomorfologiche ad esso collegate o le testimonianze che ha lasciato nel paesaggio. Secondo questa definizione, dei 51 "siti importanti" identificati nell'arco alpino da E. Salim nella sua tesi di dottorato (2018-2021), una parte della quale è integrata nel progetto AdaPT Mont-Blanc, il massiccio del Monte Bianco ne ha 10 ripartiti tra Francia, Svizzera e Italia. Se quattro di questi sono rifugi di montagna, hotel o piccoli siti vicino ai ghiacciai, gli altri sei costituiscono i siti turistici principali come ad esempio per la Francia l'Aiguille du Midi (3842 m) o Montenvers - Mer de Glace (1913 m) che costituiscono le due principali attrazioni turistiche della regione Auvergne Rhône-Alpes in termini di numero di visitatori (dati Savoie-Mont-Blanc-Tourisme). In Italia, è l'accesso a Punta Helbronner (3462 m) con la funivia "Skyway" a costituire un'importante risorsa turistica.



Di fronte al ritiro glaciale diffuso e ben documentato, il futuro di questi siti turistici è oggi in discussione. Se i siti d'alta quota (Aiguille du Midi o Punta Helbronner in particolare) sembrano per il momento poco influenzati dall'attuale evoluzione della criosfera, la situazione per i siti a quote più modeste è molto più preoccupante. A Montenvers, ad esempio (Figura 3.29), che riceve quasi 400.000 visitatori ogni anno (dati CMB), lo spessore del ghiacciaio è diminuito di oltre 200 m in poco più di 150 anni. Per scendere sul ghiacciaio è necessario installare ogni anno dei nuovi gradini (534 nel 2019) e la stabilità della grotta di ghiaccio, scavata ogni anno dal 1946, non è più garantita. A questi aspetti si aggiunge il problema del deterioramento del paesaggio causato sia dalla ritirata del ghiacciaio, sempre meno imponente sia dallo sviluppo di una copertura detritica superficiale che lo rende grigio e cupo. In questo contesto, i gestori delle infrastrutture devono individuare per tempo le impressioni e sensazioni dei propri clienti al fine di adattare l'offerta turistica al paesaggio che cambia.



**Figura 3.29. Confronto fotografico della vecchia stazione a valle della funivia che porta alla Mer de Glace (Ravanel e Moreau, 2018).** Sopra: vista a monte. Nel 1985, il rapido movimento del ghiacciaio è suggerito dall'abbondanza di crepacci. Attualmente il ghiacciaio è piatto, molto lento e coperto da detrito. Sotto: vista a valle. Nel 1986, il ghiacciaio ha colpito il contrappeso della vecchia funivia. La superficie del ghiacciaio si trova ad oggi 120 m più in basso.

Questi problemi non riguardano solo il massiccio del Monte Bianco. Nelle Alpi, numerosi altri siti stanno evolvendo in modo simile, come ad esempio sul ghiacciaio del Rodano in Svizzera, sul ghiacciaio dello Stubai in Austria o sul Theodulo tra Svizzera e Italia che rappresenta un'importante risorsa economica. In questo contesto, le attività di ricerca che saranno condotte nell'Espace Mont-Blanc si concentreranno principalmente su:

- l'evoluzione delle aspettative e degli interessi degli attuali visitatori dei siti glaciali;
- la loro percezione dell'evoluzione del paesaggio e il modo in cui ciò può influenzare il loro giudizio estetico;

- l'evoluzione dei siti dal punto di vista dei gestori, i problemi riscontrati e le esigenze in termini di adattamento.

Durante l'estate del 2019, è stata effettuata una prima fase di campo in sei iconici siti turistici glaciali nelle Alpi. Tre siti sono stati scelti nel massiccio del Monte Bianco e tre in altri massicci svizzeri e francesi al fine di sviluppare un approccio comparativo. Questa fase sul campo ha permesso di raccogliere quasi 1.000 risposte ad un sondaggio sulle aspettative e gli interessi dei visitatori e sono state condotte quasi 50 interviste semi-strutturate per approfondire questi temi e discutere sulla percezione del paesaggio. I dati raccolti sono in fase di analisi.

### 3.6 Rischi naturali

L'EMB, come il resto delle Alpi, è un territorio particolarmente sensibile ai pericoli naturali legati essenzialmente all'intensificazione del ciclo dell'acqua (Huntington, 2006) ed ai cambiamenti della criosfera (neve, ghiacciai, permafrost), entrambi fattori importanti nel controllo della stabilità di pareti e versanti (IPCC, 2019). Tuttavia, rispetto ad altre aree montane, la vulnerabilità della EMB è accentuata i) dall'alta densità di popolazione, ii) dalla significativa frequentazione turistica (Huggel et al., 2019), iii) dall'elevata energia di rilievo (quota) e iv) dall'elevata superficie interessata da ghiacciai e permafrost. Le condizioni climatiche che potrebbero avere un impatto sui rischi naturali a livello di EMB sono state presentate nelle sezioni precedenti e sono principalmente legate all'interazione tra l'aumento della temperatura, la variazione dei regimi di precipitazione, l'intensificazione degli eventi estremi (cfr. 1.3) e dei processi geomorfologici che si svolgono in alta montagna.

Nei paragrafi seguenti presenteremo un riepilogo dei principali rischi naturali presenti a livello del EMB, la loro evoluzione negli ultimi decenni e quella prevista in base ai diversi scenari climatici per il futuro. La principale fonte di informazioni utilizzata è l'ultimo rapporto IPCC *"Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate"* (IPCC, 2019).

La **degradazione del permafrost**, che è direttamente collegata all'aumento delle temperature superficiali, può ridurre la stabilità dei pendii (soprattutto in presenza di lenti di ghiaccio sepolte nel terreno come per i rock glaciers o le morene e di fratture riempite di ghiaccio come nelle ripide pareti rocciose in alta quota) e incidere sulla stabilità delle infrastrutture in alta montagna (funivie, rifugi, edifici, tralicci). Questo fenomeno è stato ben documentato per le pareti rocciose del Monte Bianco, dove i crolli di roccia sono aumentati sia in frequenza che in volume negli ultimi decenni a causa della degradazione del permafrost (Ravanel et al., 2011) e in risposta alle ondate di calore (Ravanel et al., 2017). La maggiore instabilità dei versanti in alta montagna può anche essere dovuta al ritiro dei ghiacciai che potenzialmente destabilizza le morene laterali e le pareti rocciose circostanti. Questo processo di "decompressione post-glaciale" può talvolta essere limitato dalla colonizzazione delle superfici liberate da parte della vegetazione (IPCC, 2019).

Le **valanghe di ghiaccio e la caduta di seracchi** sono processi legati all'interazione tra il riscaldamento globale e la naturale evoluzione di alcuni ghiacciai. È quindi difficile collegarli direttamente ai cambiamenti climatici e prevederne gli inneschi in futuro (Faillettaz et al., 2015). Vi è tuttavia un forte accordo sul fatto che il collasso delle fronti dei ghiacciai sospesi, o di quelli che si trovano in settori molto ripidi, sarà aggravato dall'innalzamento delle temperature basali dei ghiacciai (IPCC, 2019).

I cambiamenti attesi sul fronte dell'innevamento potranno anche influire sulla probabilità e sul tipo di innesco delle **valanghe di neve**. In alta montagna, l'innalzamento della quota del limite pioggia/neve e delle temperature aumenterà la frequenza delle valanghe di neve bagnata, anche in pieno inverno. Nelle zone di media montagna, i modelli prevedono un aumento del numero di valanghe di tipo bagnato o misto, come osservato dalla metà degli anni '70 nel massiccio del Monte Bianco (Naaïm et al., 2016). Nelle Alpi, negli ultimi decenni, è stato osservato un aumento del numero di valanghe di tipo bagnato e una riduzione nel volume delle valanghe puntuali, almeno in alcuni settori (IPCC, 2019). È importante sottolineare che le valanghe di neve bagnata possono causare danni significativi alle infrastrutture montane, come successo a Saint François-Longchamp (Savoia) nel marzo 2012, quando una valanga di questo tipo ha distrutto una seggiovia. Gli scienziati concordano sul fatto che le tendenze osservate continueranno e si intensificheranno in futuro. In sintesi possiamo aspettarci, per le valanghe, **una riduzione dei rischi a bassa quota ed un cambiamento delle tipologie di innesco in alta quota**.

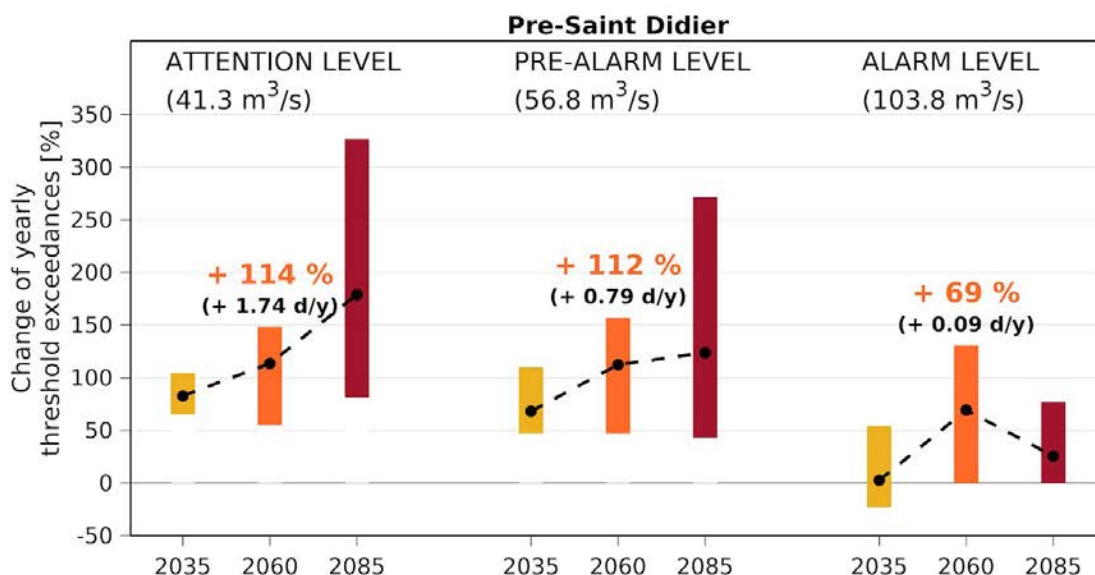
I fenomeni di piena di corsi d'acqua e colate detritiche innescati dallo **svuotamento improvviso di sacche d'acqua o laghi glaciali** sono generalmente legati alla recente evoluzione dei ghiacciai. È uno dei rischi più documentati in alta montagna e può colpire vaste porzioni di territorio. Sia a livello delle Alpi che a livello di EMB, la fusione dei ghiacciai è in effetti all'origine della formazione di molti nuovi laghi glaciali e dell'aumento di volume dei laghi già esistenti (Magnin et al., 2019). L'acqua di fusione, talvolta, viene sbarrata dalle fragili morene terminali lasciate dal ghiacciaio che possono rompersi improvvisamente in caso di tracimazione o di caduta di ghiaccio o roccia dalle pareti circostanti. A causa della fusione accelerata dei ghiacciai previsto per i prossimi decenni, **è probabile che questo fenomeno si intensifichi e possa rappresentare un rischio significativo per le vallate sottostanti**.

La degradazione del permafrost e la fusione della neve possono anche interagire con il rischio di alluvioni, colate di fango e detriti, in particolare durante i cosiddetti **eventi di pioggia su neve** che possono determinare la fusione improvvisa della neve, generando importanti volumi di acqua che scendendo possono causare danni significativi nelle vallate montane (Pomeroy et al., 2016). Gli scienziati concordano sul fatto che la frequenza di questi eventi sia già effettivamente aumentata negli ultimi decenni, specialmente in quota ed in particolare durante i cambi di stagione autunno-inverno e inverno-primavera. Tuttavia è probabile che questi eventi diminuiscano di frequenza a quote più basse per la riduzione della durata della copertura nevosa. Un recente studio (Beniston e Stoffel, 2016) prevede che nelle Alpi svizzere questi eventi saranno più frequenti in futuro per uno scenario di riscaldamento intermedio (2-4°C) e meno frequenti per uno scenario di riscaldamento estremo (RCP8.5). Questi eventi potrebbero quindi interagire in diversi modi con il rischio di alluvioni, in particolare all'inizio della primavera e alla fine dell'autunno.

In conclusione, è molto probabile che **il rischio di alluvioni, inondazioni e colate di fango e detriti, aumenterà nel EMB** a causa degli impatti sulla criosfera presentati nei paragrafi precedenti, dell'aumento nella frequenza degli eventi di forte precipitazione (figure 1.21 e 1.22) e dei fenomeni di pioggia su neve.

Sulla base degli scenari climatici e di un modello idrologico che tiene conto della fusione dei ghiacciai e della neve (Silvestro et al., 2013), la Figura 3.30 presenta la variazione del numero di giorni all'anno in cui le **soglie di allarme per le inondazioni** (allerta, pre-allarme ed allarme) saranno superate sull'asta principale dell'Dora Baltea nel tratto a monte del comune di Courmayeur in Valle d'Aosta. Per le soglie di allerta, i superamenti dovrebbero aumentare dal 70 al 100% (ovvero da 1,5 a 3,2 giorni all'anno) nel prossimo futuro (2035-2050) e di oltre il 150% entro la fine del secolo. Su base decennale, è inoltre

previsto un aumento dei superamenti per le soglie di pre-allarme ed allarme: da circa 1,3 giorni per decennio a 2,2 giorni nel 2050.



**Figura 3.30. Variazione del numero di giorni all'anno in cui vengono raggiunte le soglie di allerta per le alluvioni sul versante italiano del EMB (Pre-Saint Didier, Valle d'Aosta).** Le simulazioni si basano su tre scenari di emissioni combinate (RCP 2.6, 4.5, 8.5), un modello climatico (EC-EARTH-RCA4) ed un modello idrologico che tiene conto delle dinamiche glaciali e della neve (Silvestro et al., 2013 ). L'altezza delle barre colorate rappresenta l'incertezza dei modelli. Le cifre tra parentesi al di sotto delle soglie di allarme indicano le portate. **Fonte: Fondazione CIMA, Centro Funzionale Regione Valle d'Aosta.**

È molto importante tenere presente che le tipologie di rischio naturale presentati nei paragrafi precedenti, in un contesto di alta montagna come quello della EMB, possono agire in sinergia ed in modo cumulativo, con conseguenti effetti a cascata: una valanga di ghiaccio può, ad esempio, innescare lo svuotamento di un lago glaciale o innescare una valanga più grande. Tutte le strategie di adattamento al rischio nel EMB devono pertanto tenere conto di queste possibilità di interazione tra i pericoli. **Gli scenari di degradazione del permafrost, di ritiro dei ghiacciai e di svuotamento dei laghi glaciali suggeriscono, con elevata confidenza, che la frequenza e l'intensità di questi eventi cumulativi aumenteranno in futuro e che aumenteranno le aree soggette a questo tipo di rischi.**

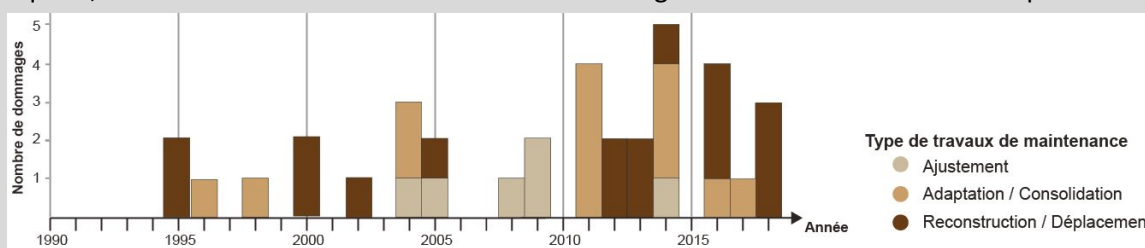


**BOX 8: evoluzione della stabilità delle infrastrutture costruite sul permafrost**

Il settore degli sport invernali, nelle Alpi occidentali, ha registrato uno sviluppo significativo negli ultimi quattro decenni e diverse centinaia di infrastrutture (impianti di risalita, rifugi, opere difensive contro valanghe, ecc.) sono state costruite in alta montagna sul permafrost (terreno permanentemente ghiacciato). Negli ultimi trent'anni, tuttavia, abbiamo assistito ad un aumento generalizzato della temperatura del permafrost alpino. Nell'attuale contesto di riscaldamento globale e di degradazione (riscaldamento) del permafrost, le infrastrutture stanno diventando sempre più vulnerabili alla possibile destabilizzazione dei loro terreni di fondazione.

Nelle Alpi francesi, alcune attività di ricerca rivolte a questi temi sono attualmente in corso nell'ambito del progetto EU-POIA PermaRisk (condotte in particolare da P.-A. Duvillard). Queste attività puntano a (1) identificare tutte le infrastrutture costruite in un contesto di permafrost, (2) realizzare un inventario dei danni subiti da queste infrastrutture sulla base di interviste con i gestori e (3) identificare i principali processi responsabili dei problemi geotecnici. L'inventario delle infrastrutture soggette a permafrost è realizzato in un Sistema Informativo Geografico (GIS) utilizzando diverse fonti di informazioni, tra cui mappe di distribuzione del permafrost (ad esempio Magnin et al., 2015) alla scala del singolo massiccio (es. Monte Bianco) e delle Alpi francesi. Su un totale di 947 infrastrutture attualmente presenti in aree soggette a permafrost il 74% di queste è rappresentata da impianti di risalita (Duvillard et al., 2015).

Il lavoro di inchiesta condotto con gli operatori ed i gestori delle infrastrutture interessate dalla presenza di permafrost ha permesso di elaborare un primo inventario dei danni. Secondo le informazioni raccolte, negli ultimi 30 anni oltre una quindicina di infrastrutture nelle Alpi francesi hanno subito ripetuti danni legati, probabilmente, alla degradazione del permafrost. Queste infrastrutture sono state danneggiate (cedimenti, basculamenti, deterioramento di fondamenta ed ancoraggi), e generalmente ripristinate (adeguamenti, consolidamenti o ricostruzioni), ma senza pensare a soluzioni geotecniche di lungo termine. Nei dati si osserva anche un aumento relativo del numero di interventi negli ultimi due decenni (9 casi tra il 2000 e il 2010 rispetto al doppio nel periodo 2010-2018; Fig. BOX8.1) nonché ad un aumento dei costi di manutenzione (Duvillard et al., 2019). Questo lavoro tuttavia non è esaustivo, a causa della mancanza di informazioni per alcune stazioni ad alta quota, ma è certamente indicativo di una evoluzione generale del fenomeno nelle Alpi.

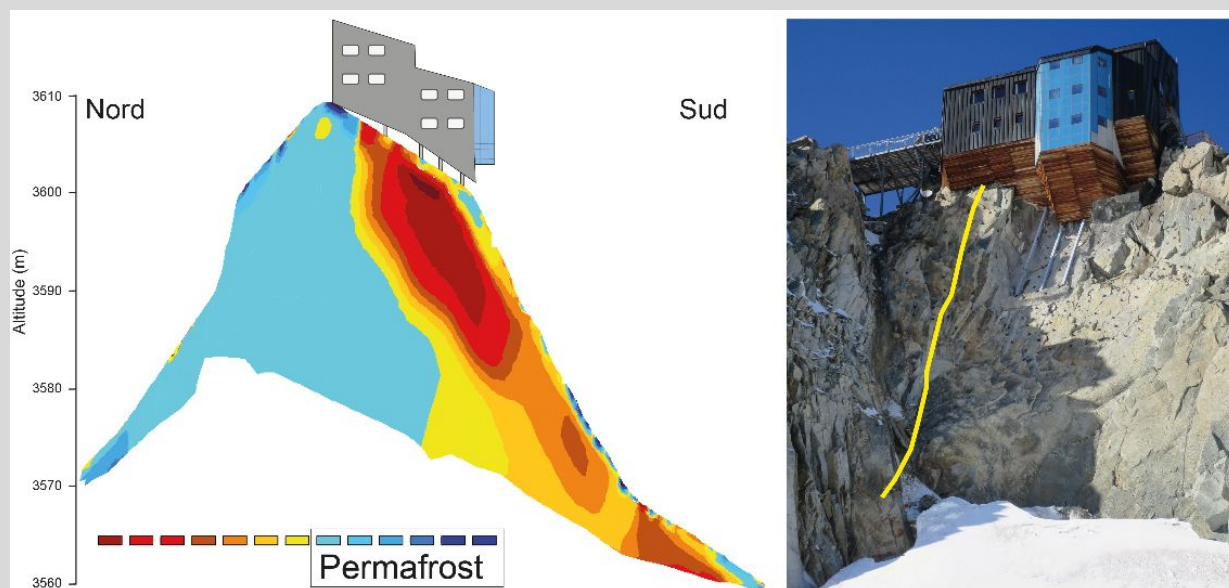


**Figura BOX 8.1.** Evoluzione del numero di danni e lavori di manutenzione sulle infrastrutture interessate dalla presenza di permafrost nelle Alpi francesi e per le quali sono state raccolte informazioni (Duvillard et al., 2019).

La maggior parte dei problemi si individua in terreni ricchi di ghiaccio come i rock glaciers. Tali danni, sarebbero sicuramente potuti essere anticipati e/o evitati con studi diagnostici e geotecnici più dettagliati, tenendo maggiormente in conto il problema del permafrost. I processi geomorfologici che causano la destabilizzazione delle infrastrutture sono essenzialmente processi lenti, a volte innescati da disturbi antropogenici e dalle strutture stesse. Per prevenire le instabilità occorre quantificare preventivamente la frazione di ghiaccio presente nel terreno e la temperatura di quest'ultimo al fine di



adottare tecniche di fondazione opportune. Ciò rappresenta una vera sfida per garantire la stabilità delle infrastrutture costruite in alta montagna ed in particolare sulle pareti di roccia. Anche se nelle Alpi francesi ci sono poche infrastrutture installate in tali contesti, queste sono particolarmente sensibili alla degradazione del permafrost, come il rifugio Cosmiques installato su un costone roccioso a 3613 m di quota nel massiccio del Monte Bianco (Fig. BOX8.2). Nel 1998, un crollo in roccia di 600 m<sup>3</sup> sul versante sud-est destabilizzò parzialmente l'edificio, richiedendo importanti lavori di rinforzo e consolidamento (Ravanel et al., 2013). Oggi il settore è sottoposto a monitoraggio geofisico e termico al fine di monitorare l'attuale evoluzione del permafrost.



**Figura BOX 8.2.** Distribuzione di permafrost nella cresta inferiore dei Cosmiques mediante tomografia elettrica nel 2016.

Di fronte alla rapida evoluzione degli ambienti di alta montagna (Bodin et al., 2015) è necessario perseguire due assi di ricerca per migliorare le conoscenze e sviluppare le competenze utili per una gestione efficace delle infrastrutture in alta quota. In particolare sarà necessario (i) continuare l'inventario dei danni per approfondire le conoscenze geotecniche sui terreni soggetti a permafrost; tali conoscenze permetteranno di (ii) proporre soluzioni tecniche concrete per la costruzione e la manutenzione delle infrastrutture interessate da questo problema.

L'area del Monte Bianco si trova quindi in un contesto generale di aumento dei rischi naturali. Tuttavia, è molto difficile modellare con precisione gli scenari di accadimento di singoli eventi specifici, data la natura caotica dei processi coinvolti e la complessità delle interazioni con le forzanti climatiche. È importante sottolineare il ruolo non trascurabile delle specificità locali per ciascun rischio e la generalizzazione rimane difficile. È quindi fondamentale sviluppare e mettere in pratica **strategie di adattamento** che agiscano a diversi livelli e che possono consentire alle comunità locali di appropriarsi di una governance efficace del tema dei rischi naturali associati alla montagna. Tra gli assi principali da privilegiare sarà importante realizzare le azioni necessarie allo sviluppo di una **cultura del rischio in montagna**, promuovendo il dialogo tra le discipline scientifiche e quelle sociali (azioni di sensibilizzazione della popolazione, promozione della conoscenza locale, collaborazione con i media, definizione di strategie attive di comunicazione, informazione e allerta della popolazione per promuovere l'accettazione sociale delle pratiche di adattamento, ecc.).

Diventerà prioritario applicare **il concetto di "rischio sostenibile"**, in cui la protezione della popolazione è uno dei principali obiettivi che implica necessariamente la presa in considerazione congiunta di scenari di sviluppo socio-economico e di scelte di sviluppo sostenibili (cfr.: progetto Alcotra RISKNET). L'obiettivo specifico dovrebbe pertanto essere lo sviluppo di una cultura transfrontaliera comune nel campo della valutazione del rischio naturale, tenendo conto degli aspetti economici, socioeconomici e sistemici. Un ruolo fondamentale è svolto anche dall'attuazione e dalla **gestione a lungo termine delle reti di monitoraggio** del territorio (integrazione di metodi di monitoraggio, monitoraggio adattivo, gestione dei sistemi di allarme, ecc. ). Parallelamente, il sostegno finanziario, sociale e politico alle **attività di ricerca e studio** sulle interazioni tra criosfera e rischi sarà un fattore chiave per colmare le lacune importanti nella comprensione dei processi e nello sviluppo di approcci previsionali o di allerta, come è stato ulteriormente sottolineato dall'IPCC nel suo ultimo rapporto sulla criosfera (IPCC, 2019). Una delle risorse più importanti del EMB, facilitata dalle numerose collaborazioni esistenti, sarà la **condivisione di esperienze a livello transfrontaliero** e tra i diversi attori del territorio (ricercatori, comuni e amministrazioni locali / regionali, professionisti, ecc.). Dal punto di vista della governance, sarà anche essenziale promuovere un'integrazione più trasversale di temi legati all'interazione tra cambiamento climatico e rischi naturali durante le fasi di **pianificazione del territorio**. Lo sviluppo e l'aggiornamento periodico delle carte di pericoli e dei rischi dovranno pertanto essere una priorità. Infine, data la difficoltà di attuare azioni di adattamento e di gestione in un contesto transfrontaliero, l'EMB dovrà promuovere momenti di scambio e diventare una vera piattaforma di collaborazione tra attori politici, amministratori e giuristi per esaminare l'applicazione del **concetto di auto-responsabilità** alla luce delle attuali variazioni delle condizioni montane.

## 4. Conclusioni

I risultati e gli scenari che emergono da questo rapporto richiedono lo sviluppo di politiche di adattamento flessibili e capaci di adeguarsi al ritmo dei rapidi cambiamenti che stiamo vivendo. Il rapporto rivela che l'aumento delle temperature e degli eventi estremi sono sfide impegnative che richiedono profondi cambiamenti socio-economici e culturali. Tuttavia emergono anche numerose opportunità strategiche per l'EMB, che senza dubbio diventerà sempre di più un'oasi di rifugio climatico sia per le specie animali e vegetali che per l'uomo.

Questo rapporto è un primo passo verso la comprensione dei cambiamenti in atto e la pianificazione delle strategie di adattamento. Durante la stesura sono state identificate alcune limitazioni e lacune, che dovrebbero essere oggetto di ulteriori approfondimenti:

i) **migliorare la comprensione di alcuni impatti sui settori socio-economici**, attualmente limitata dalla mancanza di dati o tempo disponibile per questo rapporto, come ad esempio:

- agricoltura : analisi degli impatti della siccità estiva sui sistemi pastorali di media e alta montagna, integrazione di altri agenti patogeni nella valutazione dei cambiamenti dei cicli dei parassiti e analisi del rischio di gelate tardive nelle prime fasi fenologiche ;
- acqua : analisi specifiche sulla distribuzione stagionale dello stress idrico tenendo conto dei diversi usi a livello di bacino, modellazione di scenari per l'evoluzione della temperatura dei corsi d'acqua e analisi dei potenziali impatti sugli ecosistemi fluviali, ... ;
- foreste : miglioramento dei modelli forestali utilizzando approcci deterministici, estensione dell'analisi all'intero EMB e non solo alle zone centrali del massiccio, modellando l'evoluzione dei servizi ecosistemici forestali (ad esempio sequestro di carbonio, funzioni di protezione dai pericoli naturali, ecc.) e i potenziali impatti di eventi estremi, incendi e parassiti;
- conservazione del patrimonio naturale : modellazione della distribuzione delle specie sull'intero EMB secondo i più recenti scenari climatici e di contrazione glaciale considerando, se possibile, le attività umane (frequentazione, pastorizia, ecc.), studio dell'evoluzione delle zone deglaciate come aree-rifugio per le specie alpine, monitoraggio delle capacità di adattamento delle specie chiave negli ecosistemi montani, studi pilota in connessione con i gestori degli spazi naturali per integrare le problematiche climatiche nelle strategie di gestione future ;
- turismo : studio sul ruolo sociale e culturale della montagna e sull'evoluzione di questa immagine collettiva per i turisti, gli operatori ed i professionisti, in particolare considerando gli ambienti naturali e le attività socio-economiche più colpite; valutazione degli impatti economici degli scenari futuri sul turismo invernale ed estivo ;
- rischi naturali : studio delle interazioni tra criosfera e rischi naturali in media / alta montagna con particolare attenzione agli effetti cumulativi ed a cascata ;
- salute e benessere : sviluppo di analisi specifiche sul tema.

ii) **considerare le interazioni tra i settori socio-economici**, per identificare sinergie o al contrario effetti cumulativi o a cascata come ad esempio tra turismo estivo / fuori stagione e conservazione degli ambienti naturali oppure tra risorsa idrica e agricoltura o ancora tra risorsa idrica e sostenibilità del turismo estivo o invernale.

- iii)* **considerare le interazioni e gli effetti cumulativi legati non solo ai cambiamenti climatici ma anche alla pressione antropica** sull'ambiente (es. uso del suolo, sovraffollamento, inquinamento, aumento demografico...) che, a seconda delle scelte strategiche fatte potrebbero sostenere o, al contrario, indebolire le politiche di adattamento ai cambiamenti climatici.
- iv)* **analizzare lo stato attuale e gli scenari di evoluzione dei principali servizi ecosistemici** alla scala dell'intero EMB con un approccio multidisciplinare ed incentrato sull'intero gradiente altitudinale, con un focus specifico sulle "aree cardine" tra 2000-2500 m.
- v)* **includere nelle analisi gli aspetti socio-culturali per aumentare la consapevolezza** (della popolazione, dei vari portatori di interesse e dei decisori politici) **sull'importanza delle azioni e delle politiche di adattamento** ai cambiamenti climatici nel EMB e migliorare la divulgazione dei risultati degli studi scientifici.



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



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



**Figura 3.31. Acquerello dell'artista Claire Giordano sul paesaggio della Mer de Glace nel 2015 et nel 2050, basato sugli scenari di ritiro glaciale e colonizzazione delle piante per il 2050. Fonte dei dati : IGE, Landsat/USGS © CREA Mont-Blanc**

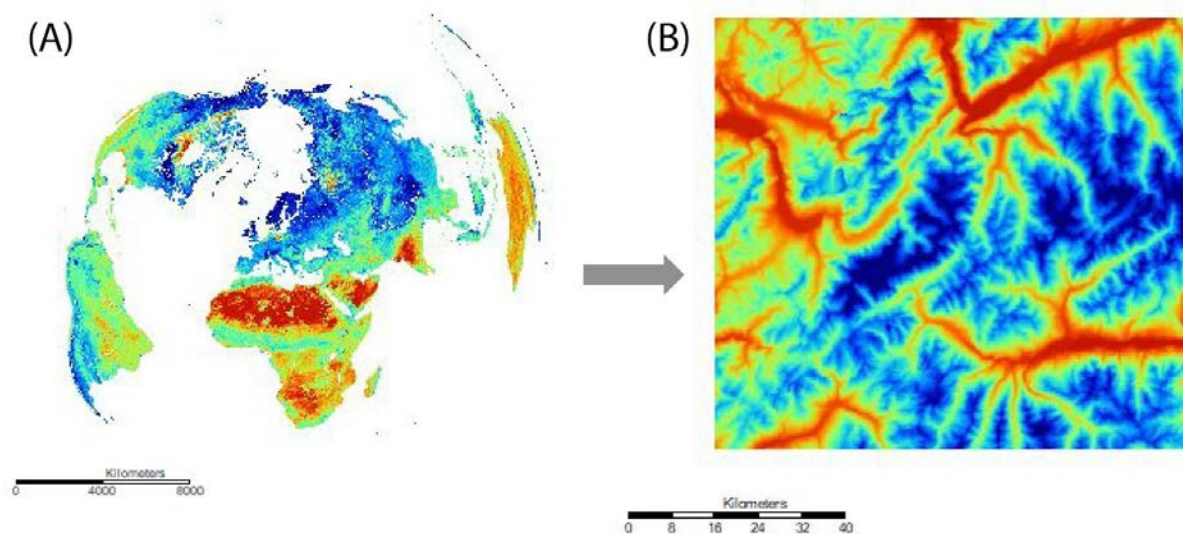


## Allegato 1 : scelta ed elaborazione dei dati climatici utilizzati

Tra i vari prodotti e dataset disponibili, abbiamo scelto di utilizzare due diverse fonti di dati: 1) i dati **CHELSA** (Karger et al. 2017) per mappare i cambiamenti climatici alla scala del EMB, e 2) gli scenari **CH2018** (CH2018) per quantificare l'evoluzione di alcuni parametri climatici che richiedono osservazioni giornaliere. Spiegheremo di seguito la metodologia utilizzata per produrre le analisi presentate in questo rapporto.

### Dati spaziali CHELSA

Disponibile dal 2017, CHELSA (Climatology at High resolution for the Earth's Land Surface Areas ; Karger et al., 2017) è un database climatico derivato dal modello fisico ERA-Interim, sviluppato e gestito dal Centro europeo per le previsioni meteorologiche di medio raggio (ECMWF). Il progetto CHELSA risponde all'esigenza di disporre di dati climatici con elevata risoluzione spaziale per i periodi attuali e futuri da parte delle comunità scientifiche specializzate in ecologia e scienze naturali. L'algoritmo, sviluppato da D. Karger al WSL di Zurigo, parte dagli scenari climatici ERA-Interim elaborati a larga scala (80 x 80 km) per stimare con, un approccio statistico di *downscaling*, le temperature e le precipitazioni su una griglia spaziale di 4 x 4 km per l'intera superficie terrestre. Il modello è stato progettato per essere utilizzato nelle aree montane e nella stima delle precipitazioni, tiene conto dei venti prevalenti e degli effetti orografici. Il prodotto base è quindi costituito da temperature e precipitazioni mensili su una maglia di 4 km.



**Figura A1.** (A) Esempio di dati grezzi CHELSA (temperature), disponibili alla scala globale ad una risoluzione spaziale di 4 x 4 km. (B) L'approccio metodologico è stato quello di adattare i dati grezzi CHELSA alla topografia del EMB tenendo conto della quota e della radiazione solare. La risoluzione delle mappe di temperatura e precipitazioni prodotte per l'EMB hanno una risoluzione di 25 x 25 m. Fonte : **WSL/CHELSA © CREA Mont-Blanc**

Per CHELSA il Presente (ovvero il periodo attuale dal punto di vista statistico) va dal 1979 al 2013. Per questo periodo è stata prodotta da Karger et al. (2017) una [serie climatologica di riferimento](#) che fornisce le temperature e le precipitazioni a frequenza mensile. In questo rapporto, ad esempio, la mappa delle temperature estive riferite al periodo attuale è la media delle temperature dei mesi giugno-luglio-agosto della serie climatologica di riferimento. L'approccio metodologico utilizzato in questo progetto è stato quello di adattare i dati grezzi CHELSA alla topografia del EMB passando dalla risoluzione iniziale di 4 x 4 Km ad una griglia di 25 m x 25 m (Figura A1). Questo ricampionamento spaziale è stato effettuato utilizzando un algoritmo di "geographic weighted regression" in grado di interpolare le temperature e le precipitazioni locali tenendo conto della quota del rilievo.

Per quanto riguarda le temperature, si è deciso di passare dalle temperature dell'aria a quelle superficiali, che in ambiente montano sono più adatte per effettuare analisi sull'uomo, la fauna e la flora. Per prima cosa è stato calcolato la radiazione media mensile per ogni pixel del EMB, tenendo conto della topografia e della nuvolosità media stimata dal satellite MODIS (<https://www.earthenv.org/cloud>). Dopodiché il bilancio radiativo è stato incrociato con le mappe di temperatura dell'aria usando lo strumento "Land Surface Temperature" del software [SAGA GIS](#). L'algoritmo è dettagliato in Boehner e Antonic (2009). Abbiamo usato questo metodo per stimare le temperature minime, medie e massime di ogni mese.

Tra gli scenari di emissione disponibili, ne abbiamo scelto uno di riscaldamento intermedio (RCP 4.5) ed uno di riscaldamento estremo (RCP 8.5). Per ciascun scenario abbiamo poi selezionato i cinque modelli climatici più rappresentativi della variazione media (maggiori spiegazioni qui <http://chelsa-climate.org/future/> e qui [CMIP5](#)). Infine per ogni scenario e per ogni mese fino al 2050, abbiamo calcolato la media dei risultati dei cinque modelli per stimare le temperature e le precipitazioni medie nel futuro. Su ciascuna mappa abbiamo poi applicato il metodo di downscaling spaziale descritto sopra.

Diversi moduli sono stati sviluppati nel software SAGA GIS per stimare vari parametri ambientali a partire dai dati CHELSA: evapotraspirazione, umidità del suolo, durata del manto nevoso e durata della stagione vegetativa. Secondo l'opinione di D. Karger, questi strumenti sono "research grade" ed in fase di validazione. Tuttavia, gli algoritmi si basano su pubblicazioni scientifiche esistenti e costituiscono potenti strumenti per stimare parametri di grande interesse in un territorio come l'EMB.

Il limite principale del dataset CHELSA è la risoluzione temporale a frequenza mensile che non consente il calcolo di quegli indici climatici che richiedono osservazioni giornaliere (giorni di gelo, giornate tropicali, ecc.; vedere l'Allegato 3).

## Serie temporali sulle stazioni : CH2018

Gli scenari CH2018 (CH2018) si basano sulle proiezioni climatiche EURO-CORDEX, che combinano simulazioni di modelli climatici globali (GCM) e regionali (RCM). In particolare, sono state utilizzate 68 simulazioni EURO-CORDEX, di cui 12 per scenari di emissione RCP2.6, 25 per RCP4.5 e 31 per RCP8.5. Questi tre scenari si basano su tassi di emissione di gas serra molto diversi: da un lato, una forte mitigazione delle emissioni, con una transizione verso la decarbonizzazione che rispetterebbe anche l'accordo di Parigi (aumento della temperatura alla fine del secolo  $< 2^{\circ}\text{C}$ , RCP2.6) e dall'altra un'emissione ancora forte (paragonabile a quello che era storicamente definito scenario "business-as-usual", aumento di temperatura alla fine del secolo di  $4-5^{\circ}\text{C}$ , RCP8.5), ed uno scenario intermedio (RCP4.5,  $+ 2.5^{\circ}\text{C}$  nel 2100). I tre scenari sono nominati sulla base della forzante radiativa che avremo alla fine del secolo, se seguiremo quel particolare scenario.

Il prodotto utilizzato (DAILY-LOCAL) è costituito da serie temporali di dati giornalieri tra il 1981 e il 2099. Vengono utilizzate cinque variabili: temperatura minima, massima e media, precipitazioni (cumulata giornaliera) e umidità relativa. Le serie temporali sono continue per l'intero periodo ("transient scenarios") e consentono di calcolare alcuni indici relativi agli eventi estremi, cosa che non era possibile fare con gli scenari CH2011 utilizzati in precedenza ("delta change approach").

I dati sono disponibili su 86 stazioni della rete MeteoSuisse, di cui undici sono state scelte per il calcolo degli indici climatici. La tabella A1 mostra le caratteristiche delle stazioni meteorologiche selezionate. La scelta delle stazioni si basa sul criterio degli analoghi climatici (Dahinden et al., 2017). Abbiamo calcolato un indice di somiglianza combinato per la temperatura e le precipitazioni tra ciascuna stazione MeteoSuisse e le stazioni di riferimento dell'Espace Mont-Blanc identificando per ciascuna stazione l'analogo climatico migliore (tabella A1). Per la maggior parte delle analisi, le stazioni sono state organizzate in tre fasce di quota: fondovalle (400-1000 m), media montagna (1000-2000 m) e alta montagna (2400-2700 m).

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

**Tabella A1: caratteristiche delle stazioni meteorologiche svizzere utilizzate per calcolare gli indici dei cambiamenti climatici.**

## Allegato 2 : Bibliografia

- 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. Alpages sentinelles. Rapport. S.l., 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., & Ravanel, 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., Gatttringer, 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., Ravanel, 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., Ravanel, 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., Bois 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., & Dobbertin, 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<sup>e</sup> 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.

## Allegato 3 : Definizioni e acronimi (definizioni contrassegnate con un \* nel testo)

**Albedo** : quantità di radiazione solare riflessa dalla superficie terrestre (ad es. la neve, bianca, ha un albedo più alto della roccia, più scura)

**CHELSEA** : Database mondiale che fornisce mappe di parametri climatici ad alta risoluzione spaziale (maglia di 4 km); CHELSA = Climatology at High resolution for the Earth's Land Surface Areas - <http://chelsa-climate.org/>

**CH2011** : Dati climatici giornalieri per le stazioni meteorologiche Svizzere, disponibili per diversi scenari fino al 2100 – [http://data.c2sm.ethz.ch/dataset/CH2011plus/seasonal\\_regional/](http://data.c2sm.ethz.ch/dataset/CH2011plus/seasonal_regional/)

**CH2018** : Dati climatici giornalieri per le stazioni meteorologiche Svizzere aggiornati in base a nuovi modelli e scenari climatici, disponibili fino al 2100 - <https://c2sm.ethz.ch/research/ch2018.html>

**CNRS** : Centro nazionale [francese] per la ricerca scientifica

**Durata dell'innevamento** : Numero di giorni in un anno idrologico (dall'inizio di settembre alla fine di agosto) con neve sul terreno

**EDYTEM** : Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne - laboratorio di ricerca universitario specializzato in geoscienze e scienze umane e sociali a Chambéry, FR

**EMB** : Espace Mont-Blanc - <http://www.espace-Mont-Blanc.com/>

**Evapotraspirazione**: Quantità di acqua trasferita nell'atmosfera per evaporazione e traspirazione dalle piante

**Gradiente altitudinale** : Variazione delle condizioni climatiche indotte dalla quota (ad es. calo delle temperature ed aumento delle precipitazioni e della nuvolosità salendo di quota)

**Gas a effetto serra** : Componenti gassosi che contribuiscono all'effetto serra su scala planetaria (vapore acqueo, anidride carbonica, metano ...)

**Gelata tardiva** : Evento di congelamento che si verifica in primavera dopo l'inizio della stagione vegetativa

**GIEC (IPCC)**: Gruppo intergovernativo (di esperti) sul cambiamento climatico – <http://www.ipcc.ch/>

**IGE** : Institut des Géosciences de l'Environnement – laboratorio di ricerca specializzato in glaciologia e idrologia a Grenoble, FR

**IGN** : Istituto nazionale di informazione geografica e forestale, fornitore di mappe e foto aeree per la Francia

**Isoterma 0°** : Limite immaginario, che può essere mappato come una linea, al di sotto della quale le temperature sono superiori a 0°C e al di sopra delle quali le temperature sono inferiori a 0°C

**Giorni estivi** : Giornate con temperature massime superiori a 25°C

**Giorni di gelo** : Giornate con temperature minime inferiori a 0°C

**Giorni di ghiaccio** : Giornate con temperature massime inferiori a 0°C

**Giorni tropicali** : Giornate con temperature massime superiori a 30°C

**Landsat** : Costellazione di satelliti NASA per l'osservazione della superficie terrestre, avviata negli anni '70

**Permafrost** : Porzione di terreno e substrato roccioso (suolo, rocce, detrito...) perennemente gelato

**Fenologia** : Eventi biologici stagionali (germoglio, fioritura, deposizione delle uova, ecc.)

**Piccola età glaciale** : Periodo climatico, nelle Alpi tra circa il 1500 e il 1850, caratterizzato da condizioni umide e fredde

**Fotoperiodo** : Lunghezza del giorno, che varia durante l'anno



**ppm:** "Parti per milione", esprime la concentrazione di gas a effetto serra \* nell'atmosfera, ovvero il numero di molecole di gas a effetto serra \* (CO<sub>2</sub>, metano, ecc.) per milione di molecole di aria

**RCP :** « Representative concentration pathway », termine del quinto rapporto IPCC che corrisponde ad uno scenario socioeconomico ed alla corrispondente concentrazione di gas a effetto serra \*

**Stagione vegetativa :** Periodo dell'anno favorevole alla crescita delle piante, quindi senza neve e con temperature giornaliere superiori a 5°C (per alberi; la soglia per le piante alpine è 0°)

**USGS :** United States Geological Survey o l'Istituto degli studi geologici degli Stati Uniti, fornitore di immagini satellitari Landsat utilizzate per lo studio delle dinamiche della vegetazione nel EMB

**WSL :** Istituto Federale Svizzero per lo studio delle foreste, della neve e dei paesaggi, Davos, CH