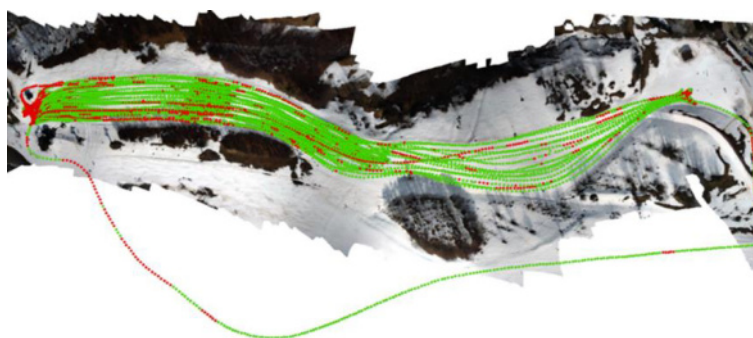


INTERREG ALCOTRA 2014-2020 Progetto “PITER Alpimed – INNOV”

Relazione attività WP 4.1.2 (risparmio energetico nelle stazioni sciistiche)



COMMITTENTE:



**Camera di Commercio
Cuneo**

**Camera di Commercio, Industria, Artigianato e
Agricoltura (CCIAA) di Cuneo**
Via Emanuele Filiberto 3
12100 Cuneo

REDAZIONE:



**Politecnico
di Torino**

Dipartimento di Ingegneria
dell'Ambiente, del Territorio
e delle Infrastrutture

Politecnico di Torino – DIATI
Corso Duca degli Abruzzi 24
10129 Torino

Ing. Irene Aicardi
Prof. Alessandro Casasso
Ing. Nives Grasso
Prof. Andrea Lingua

Sommario

Premessa	3
1 Studio sui consumi energetici e le emissioni di gas serra nelle stazioni sciistiche.....	4
1.1 Tesi di laurea (Jacopo De Santis)	4
1.2 Analisi dei dati della stazione sciistica di Prato Nevoso.....	8
2 Sviluppo di tecniche di misura dello spessore del manto nevoso	13
2.1 Misure con immagini da drone	15
2.2 Misure con tracciamento GNSS su mezzi battipista	21
3 Sviluppo di strumentazione per il monitoraggio dei cannoni da neve	25
4 Iniziative di comunicazione	27
4.1 Evento finale SMART ALTITUDE (10-11 maggio 2021)	27
4.2 Video e booklet (primavera 2022).....	28
4.3 Evento CCIAA Cuneo (28 aprile 2022)	31
4.4 Evento Straconi Week (Cuneo, 18 novembre 2022)	32
4.5 Evento finale PITER Alpimed (Nizza, 6 dicembre 2022).....	33
5 Conclusioni: risultati raggiunti, criticità, possibili sviluppi futuri	Errore. Il segnalibro non è definito.
Bibliografia.....	34

Premessa

La presente relazione descrive sinteticamente le attività di ricerca svolte all'interno del progetto PITER Alpimed – INNOV dal Politecnico di Torino – DIATI, in qualità di soggetto attuatore del lead partner Camera di Commercio, Industria, Artigianato e Agricoltura (CCIAA) di Cuneo.

Le attività svolte si inquadrano all'interno dei WP 4.1.2 (risparmio energetico nelle stazioni sciistiche) e WP 4.1.3 (risparmio idrico idrico), guidati dal prof. Alessandro Casasso e dall'ing. Irene Aicardi (a cui è in seguito subentrato il prof. Andrea Lingua).

La redazione del presente documento, che riguarda il WP 4.1.2, è a cura del prof. Alessandro Casasso e dell'ing. Nives Grasso. Alle attività svolte hanno collaborato anche l'ing. Jacopo De Santis (tesista), l'ing. Vincenzo di Pietra (ricercatore), l'ing. Costanza Gamberini (assegnista di ricerca negli anni 2019-2020), l'ing. Paolo Maschio (tecnico di laboratorio).

La relazione che segue è composta da 4 capitoli relativi alle tre attività principali del Politecnico di Torino – DIATI nel WP 4.1.2 e alle attività di comunicazione:

- Lo studio dei consumi energetici e delle emissioni di gas serra nelle stazioni sciistiche, finalizzato a determinarne gli ordini di grandezza e le principali misure per la loro riduzione (Cap. 1);
- Lo sviluppo di tecniche geomatiche per la misura dello spessore del manto nevoso, finalizzato a ottimizzare la battitura delle piste e l'innevamento programmato (Cap. 0);
- Lo sviluppo e il test di strumenti di misura della potenza elettrica e della portata idrica assorbite dai cannoni da neve, finalizzato al futuro utilizzo per audit ed eventuale sostituzione di macchine vetuste (Cap. 3).
- Nel Cap. 4 sono presentate le attività di comunicazione relative al WP 4.1.2, alle quali ha partecipato il Politecnico di Torino – DIATI.

1 Studio sui consumi energetici e le emissioni di gas serra nelle stazioni sciistiche

1.1 Tesi di laurea (Jacopo De Santis)

Le stazioni sciistiche sono spesso portate ad esempio, da giornali e blog, come attività turistica con un forte consumo energetico e un grande impatto ambientale. Tuttavia il contributo dello sci (soprattutto alpino) dà alle economie montane è innegabile e quindi è importante valutare qual è l'impatto ambientale di questa attività e capire come è possibile ridurre questo impatto.

Di questo argomento il Politecnico di Torino si è occupato con una tesi di laurea magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio (candidato: Jacopo De Santis) che è stata discussa nella sessione di ottobre 2020 ed è disponibile all'indirizzo in bibliografia [1]. Per maggiori dettagli si rimanda alla tesi, pubblicamente accessibile (URL in bibliografia).

La tesi ha affrontato innanzitutto le tre principali voci di consumo energetico di una stazione sciistica, ovvero gli impianti di risalita, gli impianti di innevamento programmato e la battitura delle piste.

Per quanto riguarda gli impianti di risalita, uno studio condotto su un database di oltre 100 impianti ha permesso di individuare una correlazione fra il dislivello superato Δh (m), la lunghezza Δx (m) e la potenza assorbita P (kW):

$$P = p_0 + a \cdot \Delta h + b \cdot \Delta x \quad (1)$$

Tale correlazione ha valori differenti per ciascuna tipologia (skilift, seggiovia 2 posti, 4 posti ecc.), come riportato in Tab. 1, mentre in Fig. 1 è rappresentato un esempio di scatterplot in 3 dimensioni.

Le correlazioni ricavate permettono di avere un'idea di massima delle potenze assorbite dagli impianti e da quali fattori influenzano questo importante indicatore: sia il dislivello che la lunghezza dell'impianto esercitano un ruolo significativo.

CABINOVIA 10 POSTI AD AMMORSAMENTO AUTOMATICO (GD10)

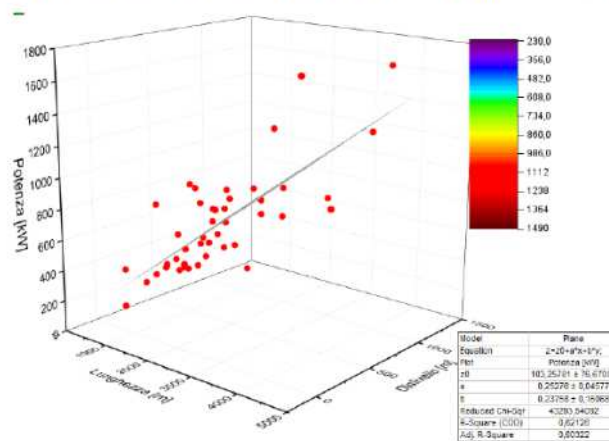


Figura 10: Fitting in due variabili per una cabinovia 10 posti ad ammortamento automatico.

Fig. 1. Esempio di correlazione fra dislivello e lunghezza di un impianto di risalita e potenza assorbita.

Tab. 1. Parametri dell'Eq. (1) per diverse tipologie di impianto di risalita.

Tipologia	p_0 (kW)	a (kW/m)	b (kW/m)	N	R^2
Skilift	6.881 ± 82.349	0.042 ± 0.022	0.163 ± 0.082	32	0.779
Seggiovia 4 posti	113.944 ± 82.349	-0.043 ± 0.076	0.812 ± 0.285	23	0.388
Seggiovia 6 posti	140.098 ± 87.164	0.101 ± 0.075	0.621 ± 0.233	20	0.555
Seggiovia 8 posti	76.230 ± 105.351	0.207 ± 0.157	0.712 ± 0.478	13	0.658
Cabinovia 10 posti	103.258 ± 76.670	0.253 ± 0.045	0.238 ± 0.161	45	0.621

Per quanto riguarda l'innevamento programmato, questa voce di consumo deve essere ulteriormente suddivisa in:

- Macchine per la produzione da neve
- Chiller per il raffreddamento dell'acqua
- Pompe dei sistemi di sollevamento

Il consumo energetico per l'innevamento programmato ha però un'incidenza relativamente modesta rispetto agli impianti di risalita. Se le potenze impegnate dall'impianto di risalita e da quello di innevamento programmato sono infatti paragonabili, il primo lavora per alcune centinaia di ore all'anno, mentre il secondo lavora per alcune decine di ore all'anno.

Infine, la battitura delle piste utilizza mezzi caratterizzati da consumi di 20-25 L/h di gasolio. È molto difficile fornire un'indicazione del tempo necessario per la battitura, poiché questo incrementa con il numero di nevicate e la quantità caduta, con la pendenza della pista, l'irregolarità del fondo ecc.

Una stima dei consumi energetici necessari per gli impianti di risalita e di innevamento programmato (elettricità) e per la battitura delle piste (gasolio) è stata effettuata utilizzando alcuni bilanci annuali di stazioni sciistiche nei quali questi dati erano riportati, talvolta con le quantità esatte, talvolta con gli importi spesi (dai quali le quantità sono state dedotte utilizzando i prezzi di quella stagione invernale).

In questi bilanci erano inoltre disponibili i numeri di presenze (giornalieri venduti o passaggi di abbonati) totali stagionali, mentre dal sito Skiresort [2] sono inoltre stati ricavati i dati di lunghezza di piste totali e di dislivello totale degli impianti. Questi ultimi dati sono stati utilizzati per ricavare 3 indicatori:

- Il consumo medio in ogni stagione per battere 1 km di pista (L/km);
- Il consumo medio in ogni stagione degli impianti di risalita, per metro di dislivello (MWh/m);
- Le emissioni di gas serra (kgCO₂eq/ingresso) medie per ciascun ingresso sulle piste.

In Tab. 2 e Tab. 3 sono riportati i risultati di questa stima sulle stagioni 2018/19 e 2017/18, rispettivamente. I valori dei tre indicatori sono compresi tra 1892 e 2861 L/km di pista, 0.306 e 1.30 MWh/m di dislivello, e fra 3.11 e 11.62 kgCO₂eq/km.

Questi intervalli sono piuttosto ampi ma presentano variazioni limitate tra una stagione e l'altra. Le emissioni pro-capite più basse si registrano nel comprensorio con più ingressi, e questo è attribuibile alle economie di scala che permettono di ridurre il rapporto fra ingressi e dislivello complessivo degli impianti, facendoli operare con un maggiore tasso di riempimento.

Il consumo di carburante per km di pista è un indicatore che potrebbe essere fuorviante, sia considerando il diverso criterio con cui vengono calcolati i km di pista, sia perché sarebbe necessario conoscere la larghezza, che può variare in modo significativo. A questo si aggiunge la significativa differenza tra i consumi necessari per battere 1 km di pista facile e 1 km di pista difficile: questo indicatore penalizza quindi i comprensori con più piste difficili.

I dati presentati sono comunque in linea con i pochi studi simili disponibili in letteratura [3].

Tab. 2. Risultati dell'analisi su consumi ed emissioni di gas serra in 5 stazioni sciistiche, nella stagione 2018/2019.

	I caso studio	II caso studio	III caso studio	IV caso studio	V caso studio
Km di piste	80	150	50	50	152
n. impianti di risalita	14	58	13	12	38
n. sciatori in una stagione	199 890	1 203 741	128 537	481 000	455 000
n. sciatori/km di pista	2 499	8 025	2 571	9 620	2 993
Dislivello complessivo degli impianti di risalita (m)	4 491	19 017	2 825	4 534	11 075
Carburante consumato (l)	241 188	333 554	94 641	270 270	326 568
Elettricità consumata (MWh)	3 426	7 024	1 542	5 878	5 045
Litri di carburante/ km di pista	3 014,85	2 223	1 892	5 405	2 148,47
MWh consumati/m di dislivello	0.763	0.369	0.546	1.30	0.455
KgCO ₂ /sciatore	11.62	3.61	7.85	7.50	7.35

Tab. 3. Risultati dell'analisi su consumi ed emissioni di gas serra in 5 stazioni sciistiche, nella stagione 2017/2018.

	I caso studio	II caso studio	III caso studio	IV caso studio	V caso studio
Km di piste	80	150	50	50	152
n. impianti di risalita	14	58	13	12	38
n. sciatori in una stagione	180 390	1 180 303	136 522	484 000	383 000
n. sciatori/km di pista	2 254	7 868	2 730	9 680	2 519
Dislivello complessivo degli impianti di risalita (m)	4 491	19 017	2 825	4 534	11 075
Carburante consumato (l)	200 261	290 892	139 813	293 050	273 924
Elettricità consumata (MWh)	2 986	5 834	1 377	5 416	4 411
Litri di carburante/ km di pista	2 503	1 939	2 796	5 861	1 802
MWh consumati/m di dislivello	0.66	0.306	0.546	1.19	0.39
KgCO ₂ /sciatore	11.15	3.11	7.70	7.16	7.61

Il dato interessante riguarda l'ampio range di emissioni di gas serra per ingresso sulle piste (3.11-11.62 kgCO₂eq/persona), peraltro in linea con i risultati del progetto europeo Smart Altitude [4,5]: per fornire un termine di paragone, è paragonabile a percorrere dai 30 ai 120 km con una utilitaria.

La tesi ha poi trattato le misure per ridurre consumi energetici ed emissioni di gas serra nelle stazioni sciistiche:

- Installazione di impianti fotovoltaici sui fabbricati di partenza, di arrivo e intermedi degli impianti di risalita: le superfici di questi fabbricati sono spesso sufficienti a coprire una percentuale apprezzabile della potenza elettrica necessaria, inoltre il profilo di utilizzo dell'impianto (che opera di giorno) è ideale per massimizzare l'autoconsumo;
- Installazione di sistemi di regolazione della velocità degli impianti di risalita, che può essere ridotta nei momenti di minore frequentazione del comprensorio;
- Ottimizzazione dei sistemi di pompaggio, utilizzando combinazioni di pompe in serie e in parallelo regolabili con inverter, in modo da poter seguire un fabbisogno di portata e di prevalenza molto variabile;
- Utilizzo di mezzi battipista ibridi;
- Utilizzo di sistemi di monitoraggio dello spessore nevoso sotto il mezzo battipista e di tracciamento GNSS in diretta, in modo da ottimizzare i passaggi dei mezzi e ridurre i km percorsi.

1.2 Analisi dei dati della stazione sciistica di Prato Nevoso

Sono stati analizzati i dati delle lance e delle ventole (“cannoni”) installate presso la stazione sciistica di Prato Nevoso, la cui disposizione è riportata nella mappa in Fig. 2, durante la stagione sciistica 2019/20. In tutto, nella stazione sciistica del monregalese, sono presenti circa 147 lance, di cui 20 sulla pista Prel (Fig. 3) oggetto dei rilievi con drone descritti nel Cap. 2, e 8 ventole che vengono ruotate fra le diverse piste.

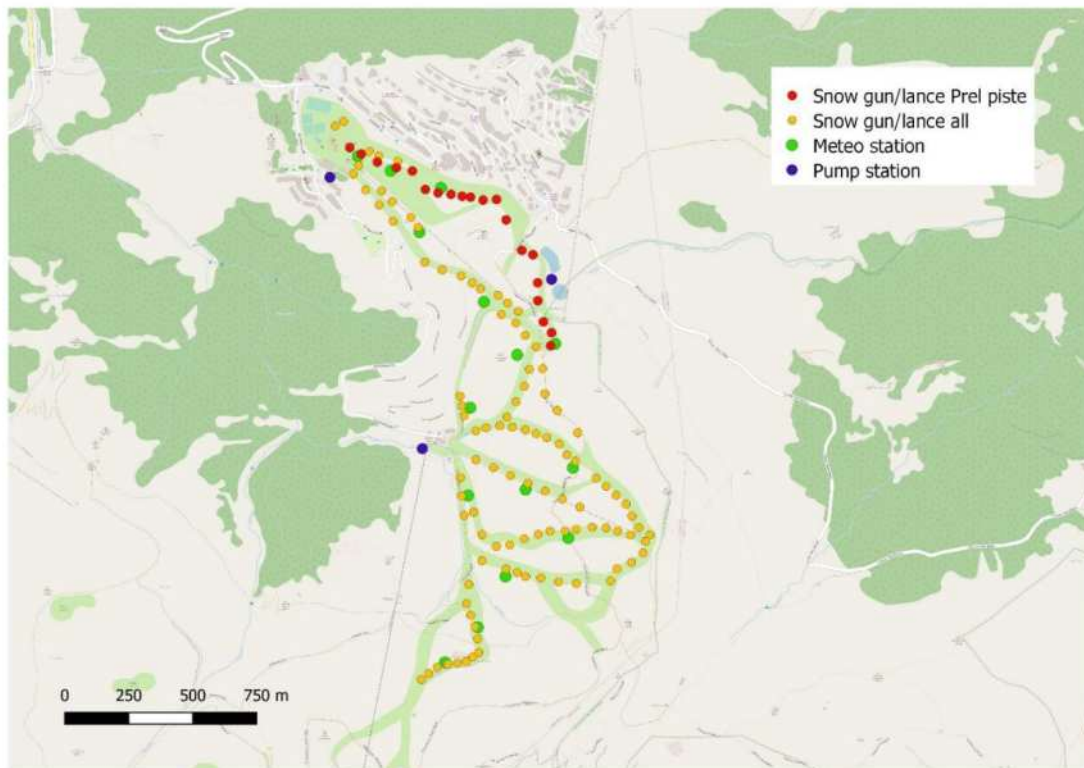


Fig. 2. Comprensorio sciistico di Prato Nevoso (CN), lance e cannoni per l'innervamento programmato (rosso), stazioni di pompaggio (blu), stazioni meteo (verde).



Fig. 3. Lance e cannoni per l'innevamento della pista Prél.

I dati vanno dal 5 novembre al 1° marzo, essendo poi sopravvenuta la chiusura per COVID.

Per comodità sono stati suddivisi in 12 decadi (n. 1: 5 novembre - 14 dicembre; n. 2: 15 novembre - 24 novembre; n. 3: 25 novembre - 4 dicembre; n. 4: 5 dicembre - 14 dicembre; n. 5: 15 dicembre - 24 dicembre; n. 6: 25 dicembre - 3 gennaio; n. 7: 4 gennaio - 13 gennaio; n. 8: 14 gennaio - 23 gennaio; n. 9: 24 gennaio - 2 febbraio; n. 10: 3 febbraio - 12 febbraio; n. 11: 13 febbraio - 22 febbraio; n. 12: 23 febbraio - 1 marzo). I grafici riportati di seguito utilizzano quindi questa convenzione di rappresentazione. In Fig. 4 si riporta la distribuzione delle ore di funzionamento cumulate di tutte le macchine operanti sulla pista Prel, che mostra come l'impianto di innevamento programmato sia stato messo in funzione principalmente fra le ore 5 e le ore 15.

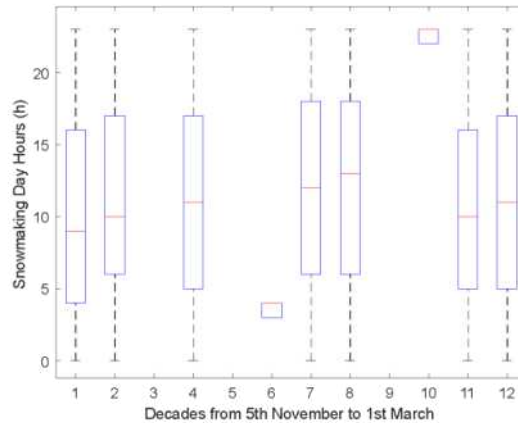


Fig. 4. Ore del giorno prevalenti di utilizzo dei macchinari da produzione neve, nella pista Prel.

In Fig. 5 sono riportate le ore totali di funzionamento di lance e ventole, per ciascuna decade. Questi dati (barrette verdi) sono stati confrontati con la temperatura di bulbo umido (funzione di temperatura e umidità relativa dell'aria) per verificare che fosse sempre soddisfatta la condizione convenzionalmente utilizzata, ovvero $T_{wb} < -2^{\circ}\text{C}$.

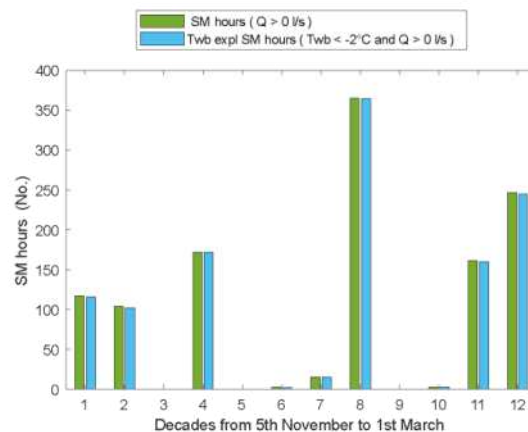


Fig. 5. Ore totali di funzionamento dei macchinari produzione neve nel comprensorio di Prato Nevoso. In verde, le ore di funzionamento indipendentemente dalla temperatura, in azzurro le ore di funzionamento con $T_{wb} < -2^{\circ}\text{C}$.

In Fig. 6 si riporta il confronto tra le ore effettive di funzionamento degli impianti di produzione neve e le ore a disposizione per effettuare l'innervamento, le cosiddette "potential snowmaking hours", che come riportato poc'anzi sono tutte le ore in cui la temperatura di bulbo umido è inferiore a -2°C . Si osserva come, nel 2019/2020, vi fosse ancora un margine residuo piuttosto significativo per ulteriore produzione di neve tecnica. L'altro fattore limitante, oltre alla temperatura atmosferica, è rappresentato dalla disponibilità idrica nei piccoli invasi (Fig. 7).

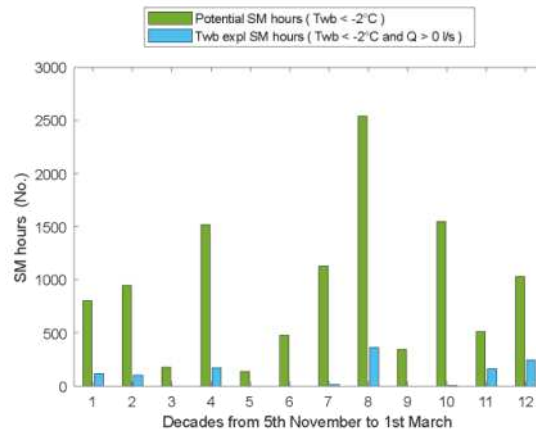


Fig. 6. Confronto tra le ore di funzionamento effettivo delle macchine da produzione neve (in azzurro) con le ore di potenziale utilizzo (potential snowmaking hours, in verde).



Fig. 7. Laghetti per l'innevamento tecnico a Prato Nevoso, con volumi rispettivi di 27mila mc (a sx) e 11mila mc (a dx).

Passando all'analisi del rendimento delle macchine da produzione neve, in Fig. 8 si riporta la correlazione fra la temperatura di bulbo umido (in ascissa) e la portata idrica trattata da una ventola (in ordinata). È evidente che temperature più fredde permettono di trattare una maggiore portata e, quindi, di avere maggiori produzioni orarie. Questo è dovuto al fatto che, con un'aria più fredda, è possibile miscelare più acqua insieme all'aria compressa riuscendo comunque a ottenere la formazione delle "sferette" di ghiaccio che riproducono la neve naturale. Un altro parametro da considerare, e che purtroppo nel grafico non è visibile, è l'impostazione di qualità della neve: per il "fondo" della pista da poggiare sul prato non innevato, è possibile infatti utilizzare un maggiore rapporto acqua/aria compressa, ottenendo una neve più "pesante" e umida; per la parte superiore, sulla quale passeranno gli sciatori, è necessario un rapporto acqua/aria compressa più basso (a parità di temperatura di bulbo umido) e quindi si riduce la producibilità oraria.

Considerato che la densità della neve tecnica è di circa 400 kg/m^3 , per ogni metro cubo di acqua si producono 2.5 m^3 di neve. Con le portate massime di circa $12\text{-}14 \text{ m}^3/\text{h}$ d'acqua è quindi possibile

ottenere circa 30-35 m³/h di neve con ogni macchina. Considerato che l'assorbimento tipico di una ventola è di circa 20-25 kW, si deduce che il consumo energetico per produrre 1 m³ di neve è di almeno 0.6-0.7 kWh; i valori più tipici sono nell'ordine di 1-2 kWh/m³. A questi valori si devono aggiungere i consumi energetici per il pompaggio, che portano il totale a 1.5 – 9 kWh/m³ di neve [6].

Il grafico in Fig. 8 evidenzia però il legame molto forte tra la temperatura di bulbo umido e la capacità, nonché l'efficienza, nella produzione di neve tecnica. Il trend di riscaldamento globale incide non solo sulle precipitazioni nevose naturali, ma anche sulle ore di possibile utilizzo degli impianti di innevamento tecnico (le "potential snowmaking hours"), sulla possibilità di produrre in quelle ore una quantità sufficiente di neve, nonché sull'efficienza energetica del processo [7,8].

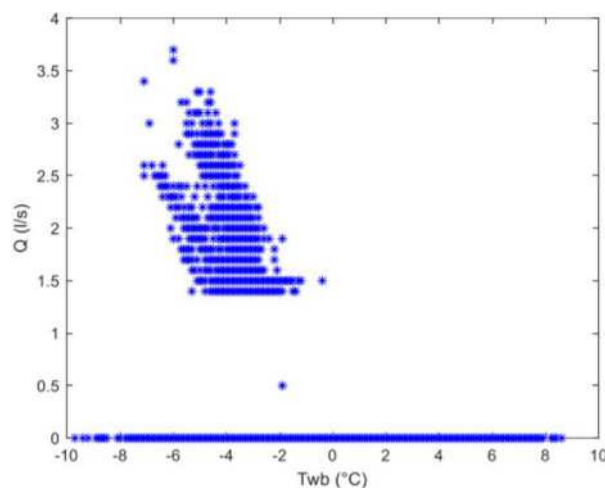


Fig. 8. Portata idrica trattata da un cannone da neve, al variare della temperatura di bulbo umido.

2 Sviluppo di tecniche di misura dello spessore del manto nevoso

I recenti sviluppi nelle tecnologie geomatiche, in particolare UAV (Unmanned Aerial Vehicles) e ricevitori GNSS (Global Navigation Satellite Systems), offrono interessanti opportunità per l'ottimizzazione della produzione di neve tecnica. Con l'emergere di tecnologie, ormai consolidate, nel campo della misura e del monitoraggio, le tipiche tecniche di misura manuali vengono sempre più sostituite da nuove metodologie che prevedono l'utilizzo di dati SAR e di Telerilevamento Ottico, Laser Scanner Terrestre (TLS), indagini georadar (GPR) e tecniche fotogrammetria da UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o terrestri, grazie anche alle ridotte dimensioni dei sensori che consentono di implementarli in diversi dispositivi [9]. La fotogrammetria e gli algoritmi di *Structure from Motion* (SFM) stanno diventando tecniche sempre più utilizzate in diversi campi applicativi. A tal proposito il gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino ne ha proposto l'utilizzo nell'analisi della profondità del manto nevoso in ambienti alpini.

Rispetto alle altre tecniche citate, la fotogrammetria UAV consente di ottenere con buona accuratezza e un elevato dettaglio [10] la ricostruzione tridimensionale dell'oggetto di studio, oltre alla rimozione di aree nascoste/in ombra durante la fase di rilevamento, che caratterizzano principalmente le tecniche di rilevamento terrestre (es. TLS), dovute alla presenza di zone inaccessibili da terra. Inoltre, questa tecnica è particolarmente efficiente per il monitoraggio, flessibile e facilmente ripetibile, consentendo una notevole riduzione dei tempi di acquisizione. Ovviamente l'utilizzo di velivoli senza pilota richiede anche diversi accorgimenti in base alle condizioni meteorologiche, quali la presenza di forte vento o perturbazioni.

Il Politecnico di Torino si è quindi impegnato a studiare e validare una metodologia di stima della profondità del manto tramite la generazione di mappe di altezza neve, che vengono calcolate attraverso la differenza di due modelli altimetrici (DEM) realizzati per la stessa area di studio, uno relativo ad acquisizioni al suolo senza la presenza di neve e uno sul manto nevoso [11].

Contemporaneamente si è valutato l'utilizzo di sensori GNSS per il tracciamento dei mezzi battipista al fine di monitorarne i percorsi e migliorare la modellazione delle piste riducendo il consumo di carburante. Ad oggi, la maggior parte dei produttori di mezzi battipista è in grado di installare sensori che consentono loro di tracciare il percorso dei veicoli oltre a stimare, in tempo reale, l'altezza del manto nevoso. Tuttavia, l'accesso ai dati è possibile solo attraverso abbonamenti molto costosi che, soprattutto i comprensori più piccoli, non sarebbero in grado di coprire. Attualmente sul mercato sono disponibili molti tipi di ricevitori GNSS, dai ricevitori geodetici a tripla frequenza e multi costellazione ai ricevitori a singola frequenza e singola costellazione con diverse fasce di prezzo. I ricevitori a basso costo e a doppia frequenza possono utilizzare entrambe le frequenze (L1 e L2) per rimuovere gli errori dovuti alle condizioni atmosferiche (es. ionosfera) e ambientali (es. multipath), ottenendo una

precisione nel posizionamento fino al livello centimetrico. Inoltre, le piccole dimensioni delle antenne e dei ricevitori GNSS ne consentono l'installazione su qualsiasi tipo di veicolo, rendendole un'ottima soluzione per il tracciamento dei mezzi battipista.

Nei successivi paragrafi verranno descritte le attività e le prove effettuate per raggiungere gli obiettivi del progetto, riguardanti la stima dell'altezza della neve e il monitoraggio dei percorsi dei mezzi battipista.

I test di acquisizione dei dati topografici e fotogrammetrici sono stati eseguiti su due aree studio differenti. La prima è una pista nera, denominata Pista Armand (ALP), nel territorio di Limone Piemonte, che presenta le seguenti caratteristiche: quota minima 1396 m, quota massima 1582 m, pendenza media 33%, esposizione E (Fig. 9).



Fig. 9. Area di studio a Limone Piemonte (CN): la pista "Armand" a quota 1400.

Il secondo caso studio è una pista blu, Prél (PPN), parte del comprensorio di Prato Nevoso, che presenta le seguenti caratteristiche: quota minima 1456 m, quota massima 1678 m, pendenza media 17%, esposizione SE (Fig. 10).



Fig. 10. Area studio a Prato Nevoso (CN): la pista Prèl.

2.1 Misure con immagini da drone

L'acquisizione dei dati fotogrammetrici sulle piste da sci può essere un'operazione abbastanza critica. Ciò è dovuto non solo alle caratteristiche dell'ambiente, come la pendenza del terreno, la presenza di vegetazione, ma anche alla presenza di elementi antropici, come edifici a bordo pista e impianti di risalita. Un aspetto che complica ulteriormente l'acquisizione durante il periodo invernale è la massiccia presenza di sciatori, sia in pista che nelle zone limitrofe. Si dovrebbe anche tenere conto di come le basse temperature influiscano sulla durata della batteria dei sensori utilizzati.

Per eseguire i test si è quindi scelto di sfruttare diverse soluzioni commerciali, a seconda del contesto (vegetazione, spazio di decollo e atterraggio), degli aspetti operativi (presenza di persone in pista) e delle condizioni meteorologiche (presenza di vento).

La Tab. 4 mostra i sistemi UAV scelti per acquisire i dati e le loro caratteristiche.

Tab. 4. Specifiche delle piattaforme UAV utilizzate.

	DJI Phantom 4 Pro	DJI Mavic 2 Pro	DJI Mavic Mini
Peso al decollo	1388 g	907 g	249 g
Autonomia di volo	30 minuti	31 minuti	30 minuti
Distanza di volo	14 Km	18 Km	16 Km
Sensore	CMOS da 1" 20 MP	CMOS da 1" 20 MP	CMOS da 1/2,3" 12 MP
Lunghezza focale della fotocamera	24 mm f/2.8-11	28mm f/2.8-11	24 mm f/2.8

Per ogni pista da sci sono stati eseguiti tre rilievi aerei:

- uno per misurare l'altitudine di riferimento del terreno in assenza di neve, durante la stagione estiva/autunnale;
- altri due voli sono stati effettuati durante la stagione sciistica per misurare la profondità della neve e validare la procedura.

Al fine di coprire l'intera area di studio, mantenendo sempre una buona visibilità del drone, le piste sono state suddivise in più parti con un dislivello massimo di 60 m. Inoltre, per irrobustire il calcolo del blocco fotogrammetrico, data l'inclinazione del terreno, per ogni volo sono stati acquisiti dati sia sorvolando strisciate con la fotocamera in posizione nadirale che strisciate con fotocamera obliqua (inclinazione di circa 30 gradi, corrispondente approssimativamente a quella del pendio) (Aicardi et al., 2016a; Lingua et al., 2017).

In base alla piattaforma UAV utilizzata e al sensore ottico di bordo, i voli sono stati effettuati ad un'altezza tale da garantire una Ground Sample Distance (GSD) (dimensione del pixel a terra) media di circa 2 cm. In Tab. 5 vengono descritte le principali caratteristiche dei voli effettuati.

Tab. 5. Caratteristiche dei voli effettuati.

La zona	Persone in pista	UAV	N. immagini	Media GSD [cm/px]
ALP Niente neve	No	Phantom 4 Pro	1906	1,51
ALP snow-I test	No	Phantom 4 Pro	741	1.81
ALP neve-II test	sì	Mavic Mini	937	2.02
PPN Nessuna neve	No	Mavic 2 Pro	1096	1.41
PPN neve-I test	sì	Mavic Mini	553	1.92
PPN neve-II test	sì	Mavic Mini	721	2.43

Durante tutti i test sono stati utilizzati sia punti di controllo a terra (GCP) che i Check Point (CP) per ottimizzare la costruzione del blocco fotogrammetrico, georeferenziare il modello e convalidare l'accuratezza del risultato finale. Prima dei voli sono stati infatti posizionati nell'area di studio dei pannelli plastificati (40x40 cm). Data la necessità di garantire la sicurezza degli sciatori, non potendo chiudere la pista da sci al pubblico durante l'inverno, se non per pochi minuti, i marker sono stati posti solo sui lati esterni della pista, su neve non battuta, e fissati con chiodi. La posizione dei marker è stata acquisita con un ricevitore GNSS, utilizzando un approccio RTK (tramite una connessione Internet GSM per ricevere le correzioni) (Fig. 11). Le coordinate di questi punti sono state stimate con precisione centimetrica (3 cm) e ambiguità fissate per tutti i punti.



Fig. 11. Misurazione dei GCP con approccio RTK.

Inoltre a Limone Piemonte è stata realizzata una rete topografica, materializzando due vertici e misurandoli con un ricevitore geodetico GNSS in modalità statica. Le coordinate dei punti sono state stimate utilizzando i dati della stazione permanente di Mondovì, della rete CORS (Continuously Operation Reference Stations) della Regione Piemonte, e ottenendo un livello di precisione millimetrica. Successivamente sono stati misurati alcuni punti fotografici ben visibili dai voli UAV con una stazione totale posizionata sui vertici di riferimento (Fig. 12).

Le misurazioni sono state successivamente compensate per stimare le coordinate finali con un RMSE stimato inferiore a un centimetro.



Fig. 12. Rilievo di dettaglio con la stazione totale.

Lo scopo delle acquisizioni di immagini aeree è stato quello di produrre Modelli Digitali del Terreno (DTM) delle piste da sci in presenza e non di neve, per la stima dell'altezza della neve. I dati UAV derivanti dalle sei acquisizioni sono stati elaborati utilizzando il consolidato approccio Structure from Motion (SfM) [12].

Questi algoritmi, che ora sono implementati in diversi software commerciali e portano tutti all'allineamento delle immagini, alla generazione di nuvole 3D di punti dense e, successivamente, alla produzione di una mesh triangolata, ai modelli digitali di elevazione (DEM) e all'estrazione di ortofoto. In questo caso studio, il processo fotogrammetrico è stato effettuato utilizzando la soluzione commerciale AMP (Agisoft Metashape Professional). Per ogni set di dati, le immagini nadirali e oblique sono state elaborate insieme. Il software è stato impostato per allineare le immagini con una precisione "elevata", ovvero utilizzando le immagini con la loro dimensione originale. Per georeferenziare il blocco fotogrammetrico e migliorare la stima dell'orientamento esterno, nelle foto sono stati collimati diversi GCP, mentre alcuni CP sono stati utilizzati per validare l'accuratezza del modello (Tab. 6). Sono state quindi prodotte nuvole di punti dense 3D con un livello di dettaglio elevato. Dopo la fase di orientamento (Bundle Block Adjustment), le nuvole di punti dense sono state calcolate dai vari algoritmi implementati e hanno permesso di ottenere prodotti adatti per rappresentazioni a grande scala (Tab. 7).

Tab. 6. Risoluzione delle immagini e target misurati per la georeferenziazione del modello e per la stima dell'accuratezza.

set di dati	Ris. immagine [px]	N. GCP	N. CP
ALP Niente neve	5472 x 3648	41	14
ALP snow- I test	5472 x 3648	10	5
ALP neve- II test	4000 x 2250	13	10
PPN Nessuna neve	5472 x 3648	36	12
PPN neve- I test	4000 x 2250	28	10
PPN neve- II test	4000 x 2250	34	10

Tab. 7. Residui sui CP sulle nuvole di punti dense risultanti.

Dataset	Residui sui CP [mm]			N. punti della nuvola densa [Milioni di punti]
	X	Y	Z	
ALP Niente neve	14	18	27	350
ALP snow- I test	11	10	13	77
ALP neve- II test	23	19	50	85
PPN Nessuna neve	27	19	43	103
PPN neve- I test	15	29	19	119
PPN neve- II test	11	22	42	93

Gli output di queste operazioni sono rappresentati da nuvole dense di punti, che descrivono sia il terreno che gli oggetti sopra di esso (es. vegetazione, edifici, impianti di risalita ecc.). Secondo i dati acquisiti, le nuvole di punti ottenute offrono modelli 3D completi delle piste da sci. In genere il livello di rumore delle dense nuvole di punti è piuttosto contenuto, solo alcune zone, oltre i confini del versante Armand, sono disturbate dalla presenza di vegetazione. Unica eccezione il primo test effettuato sulla pista Armand in presenza di neve. Durante la fase di rilievo, a causa della rapida variabilità delle condizioni meteorologiche, le immagini della parte bassa della pista sono state acquisite in condizioni di luce uniforme. L'assenza di ombre e l'uniformità del manto nevoso battuto dal mezzo battipista, hanno impedito agli algoritmi SFM di identificare punti omologhi. In questa circostanza, sebbene i residui su GCP e CP fossero accettabili, la densa nube era visibilmente molto rumorosa in questa zona e questo porterebbe ad una errata stima dello spessore. Sono stati effettuati diversi test sulle immagini: oltre al bilanciamento del bianco, è stato applicato il filtro Wallis, variando di volta in volta i vari parametri (es. dimensione della finestra, contrasto, ecc.). I risultati ottenuti non sono stati però soddisfacenti e si è deciso di elaborare solo le immagini relative alla parte alta della pista, acquisite in presenza di luce solare.

Per eseguire analisi sul comportamento del suolo è risultato fondamentale filtrare queste informazioni e ottenere un DTM (Digital Terrain Model). AMP è stato quindi utilizzato per classificare i punti a terra con un approccio automatico. La procedura di classificazione automatica prevede una prima approssimazione del modello del terreno dai punti più bassi rilevati. Successivamente, ogni altro punto viene aggiunto alla classe "terreno" solo se la sua posizione è entro una certa distanza dal modello del terreno e se l'angolo tra il modello del terreno e la linea di collegamento di questo nuovo punto ad un

punto della classe "terreno " è inferiore a un determinato valore dell'angolo, impostato dall'utente. Questa operazione è stata ripetuta per tutti i dataset e, infine, tutti i punti classificati come "terreno" possono essere utilizzati per generare i DTM. Per questo studio di ricerca, oltre ai DTM, sono stati estratti anche i Digital Surface Models (DSM) e le ortofoto nel sistema di coordinate WGS84 – UTM 32N. Le risoluzioni di questi prodotti sono state assegnate in base alle precisioni dei modelli 3D ottenuti, di circa 3-4 cm.

I DTM ottenuti dal processo fotogrammetrico sono serviti come dati di input per la stima dell'altezza della neve. L'analisi si è focalizzata esclusivamente sull'area delle piste da sci, considerando uno scostamento di circa 1 m rispetto ai bordi. Per la stima dell'altezza della neve, l'altezza del terreno senza neve, è stata sottratta all'altezza del manto nevoso negli altri DTM realizzati, utilizzando il toolbox Raster Math, del software ArcMap (ArcGIS). Gli output di questa operazione sono nuovi prodotti raster (immagini digitali), contenenti in ogni cella il valore dell'altezza della neve.

Per stimare lo spessore della neve è stata calcolata la differenza di altezza tra il DTM del terreno innevato e il DTM della pista innevata (Fig. 13).

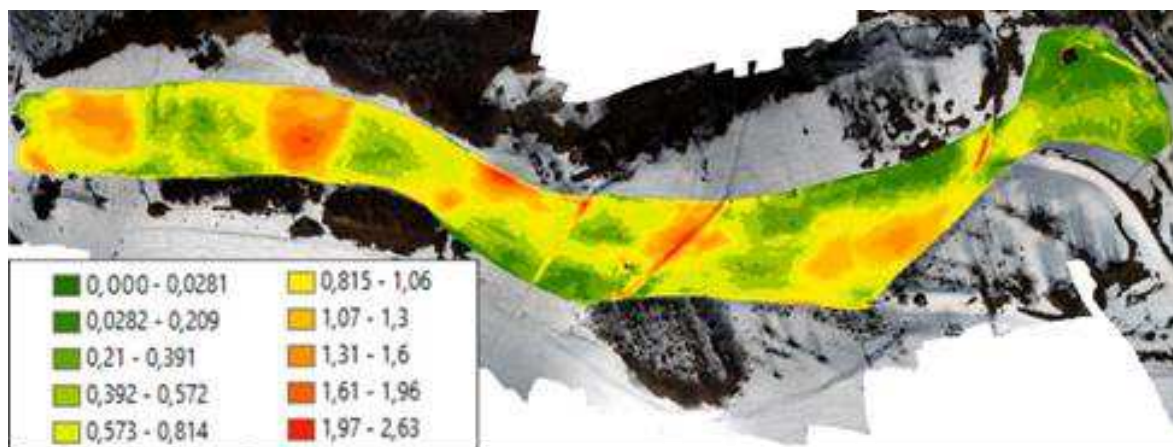


Fig. 13. Esempio di stima dell'altezza della neve, come differenza tra il DTM del livello di neve della pista Armand, realizzato con i dati raccolti durante la seconda campagna di rilevamento, e il DTM che rappresenta l'altezza "zero" del terreno (valori espressi in metri).

La Tab. 8 mostra l'altezza media, massima e minima della neve, stimata sulle due aree di studio.

Tab. 8. Valori di profondità della neve.

Set di dati (neve)	Spessore medio [m]	Spessore massimo [m]	Spessore minimo [m]
ALP snow- I test	1.08	2.6	0,48
ALP neve- II test	0,67	2.63	0.22
PPN neve- I test	0.92	2.50	0.04
PPN neve- II test	0.73	2.43	0.07

I valori stimati dello spessore della neve sono coerenti con quanto previsto dai gestori dei comprensori sciistici. Come ipotizzato vi sono variazioni lungo le piste da sci, dovute principalmente alla presenza di avvallamenti e percorsi pedonali sul terreno originario. Le differenze tra lo spessore calcolato a seguito delle prime prove, effettuate a fine gennaio, e lo spessore stimato dopo la seconda prova, effettuata ad inizio marzo, per ciascuna delle due stazioni, mostrano come, l'aumento delle temperature tipiche della tarda stagione, abbia provocato una leggera diminuzione del manto nevoso. L'effetto dello scioglimento della neve è apprezzabile sul fondo delle piste, dove la neve è particolarmente sottile, anche a causa del massiccio passaggio di persone.

2.2 Misure con tracciamento GNSS su mezzi battipista

Un ulteriore obiettivo di questa ricerca è stato quello di effettuare un test di monitoraggio del percorso effettuato dal mezzo battipista e consentire ai gestori delle piste da sci di Limone Piemonte di quantificare il consumo di carburante.

A tal fine, abbiamo analizzato le prestazioni del ricevitore Tersus BX-306 (Tab. 9), una scheda GNSS RTK a basso costo e doppia frequenza per il posizionamento a livello centimetrico: fornisce misurazioni grezze che possono essere integrate con autopiloti e unità di navigazione inerziale. Il ricevitore utilizzato supporta tre costellazioni (GPS L1/L2, GLONASS G1/G2 e BeiDou B1/B2) per garantire la continuità e l'affidabilità della misura RTK.

Tab. 9. Caratteristiche di Tersus BX-306.

Ricevitore GNSS	Tersus Precis BX-306
Immagine	
Prezzo	\$1,699.00
Consumo di energia	3,5 W
Peso	23g
costellazioni	GPS L1/L2, GLONASS G1/G2, BeiDou B1/B2
Frequenza di aggiornamento della posizione	1Hz-20Hz
Formato dati grezzi	Protocollo binario Tersus (TRS)
Tipo di correzioni	RTCM 2.x/3.x/CMR/CMR+

Questo ricevitore è in grado di applicare correzioni differenziali trasmesse da un software che gestisce la rete CORS e di salvare dati grezzi (fase portante, misure pseudorange e Doppler) su un laptop.

Il Tersus BX-306 è stato impiegato insieme all'antenna di rilevamento AX3702, le cui caratteristiche si possono vedere in Tab. 10.

L'antenna è stata montata sulla parte superiore del mezzo battipista e un laptop, collegato al ricevitore tramite interfaccia USB, è stato posizionato all'interno del veicolo per avviare e registrare i dati GNSS (Fig. 14).

Tab. 10. Caratteristiche dell'antenna GNSS AX3702 di Tersus.

Antenna GNSS	AX3702
Immagine	
Prezzo	\$ 160,00
Guadagno	5,5 dBi
Peso	374 g
costellazioni	GPS L1/L2, GLONASS G1/G2, BeiDou B1/B2

Le correzioni sono state ottenute via radio da una stazione base posta su un punto noto della rete di riferimento per un accurato posizionamento in tempo reale, al fine di risolvere le ambiguità di fase della portante GNSS.

Il ricevitore è stato impostato per fornire una soluzione con una frequenza di campionamento di 1 Hz. Inoltre, è stato necessario inizializzare l'acquisizione dei dati pochi minuti prima che il mezzo battipista iniziasse a muoversi, poiché il Tersus GNSS richiede un tempo di 60 secondi per la prima correzione, che ottiene facilmente anche con baselines lunghe.

Conosciute le posizioni misurate dal ricevitore GNSS, è possibile stimare l'altezza della neve rispetto alla lama battipista, con la quale verrà poi modellata la superficie. Con una stazione totale è stato stimato il braccio di leva tra l'antenna GNSS e il punto centrale della pala, che viene a contatto con la neve. Per stimare correttamente l'altezza della neve rispetto alla posizione del veicolo, occorre tener conto del suo assetto durante il movimento; pertanto, l'imbardata e l'inclinazione del mezzo battipista sono stati stimati considerando la sua posizione rispetto a quella precedentemente stimata.

L'acquisizione dei dati è stata effettuata la notte prima di uno dei voli dell'UAV ed è durata circa tre ore.



Fig. 14. Il mezzo battipista (a sinistra) e l'installazione dell'antenna sulla parte superiore del veicolo.

La valutazione della qualità del posizionamento è stata condotta considerando la deviazione standard media, massima e minima, calcolate nelle componenti Nord, Est e Up.

Le soluzioni ottenute con il Tersus BX-306 hanno mostrato che i valori di deviazione standard media sono inferiori a 1 cm per le componenti orizzontali, mentre circa 1 cm per la componente verticale.

Per ottenere la massima precisione nel posizionamento RTK, è fondamentale fissare le ambiguità di fase della portante a numeri interi. Abbiamo, quindi, considerato un metodo statistico noto anche come test del ratio [13]. Valori di rapporto elevati (>3) indicano che la soluzione scelta è almeno 3 volte migliore della successiva soluzione più probabile e la soluzione può essere definita “fissa”; altrimenti, se il valore di ratio è compreso tra 0 e 3 allora la soluzione sarà definita “float”.

Durante il test di posizionamento RTK la percentuale di soluzione Float è stata pari al 22%, mentre le ambiguità della fase portante sono state fissate a numeri interi per il 78% delle soluzioni (Fig. 15).

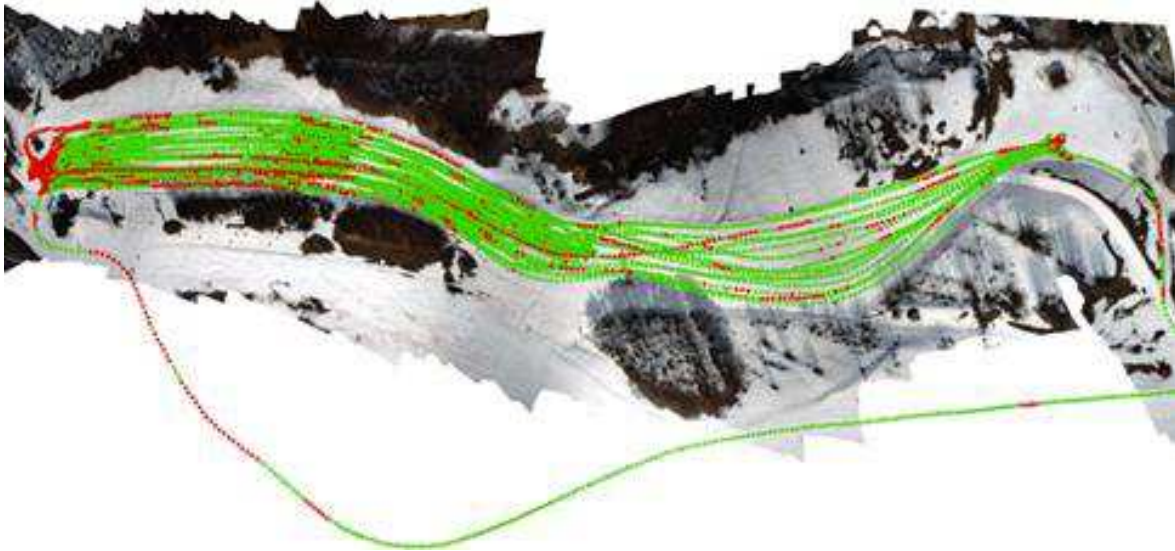


Fig. 15. Il posizionamento del mezzo battipista: in rosso sono rappresentate le soluzioni Float e, in verde, le soluzioni Fixed.

Conoscendo il braccio di leva tra l'antenna GNSS e il punto centrale nella parte inferiore della pala, e l'assetto del veicolo, stimato considerando la posizione precedentemente misurata, è possibile calcolare l'altezza della neve, in un certo punto in un momento specifico. Lo spessore della neve può essere stimato come differenza tra l'altezza del fondo della pala e l'altezza del terreno di riferimento (Fig. 16). Questo rappresenta il primo passo di un lavoro di ricerca volto a stimare l'altezza della neve, in tempo reale, durante le operazioni di modellazione della neve.

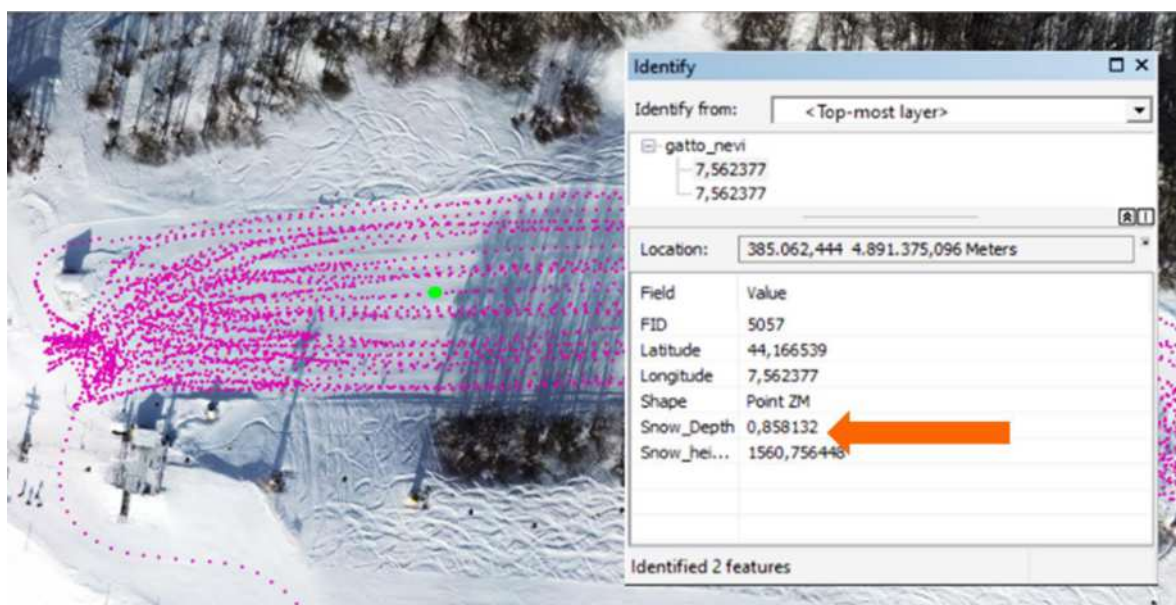


Fig. 16. Visualizzazione della quota neve su un Sistema Informativo Territoriale (GIS), stimata come dislivello tra il punto più basso della pala e il terreno di riferimento.

3 Sviluppo di strumentazione per il monitoraggio dei cannoni da neve

Nell'ambito del progetto è stata sviluppata, in collaborazione con l'azienda OM3 di Leseugno (CN), un'apparecchiatura per la misurazione e registrazione della potenza elettrica assorbita utilizzabile con macchinari con alimentazione trifase a 5 poli fino a 63 Ampere, pari a circa 25 kW di potenza (Fig. 17). Tali apparecchiature sono quindi in grado di misurare e registrare la potenza elettrica assorbita e sono composte da tre pinze amperometriche collegate ad una scheda Arduino, a sua volta connessa con un modulo per scheda SD e un modulo "internal clock" per il mantenimento della sincronizzazione oraria. Questa apparecchiatura può quindi essere utilizzata per il monitoraggio di vecchi cannoni da neve sprovvisti di sistema di misura a bordo, anche per poterne valutare la sostituzione.



Fig. 17. Datalogger di potenza elettrica trifase penta polare: strumento con spina e presa (A), particolare della scatola con le 3 pinze amperometriche e la scheda Arduino con SD card (B), collegamento ad alimentazione (C) e schermata della potenza misurata sulle tre fasi (P_R, P_S e P_T) (D).

Per quanto riguarda invece la misurazione della portata, la principale difficoltà tecnica nel caso dei cannoni da neve è legata alle elevate pressioni d'esercizio, superiori a 30 atm, che impediscono di utilizzare i comuni contatori volumetrici.

Per questo motivo sono stati sperimentati dei misuratori di portata a ultrasuoni, che si basano sulla misurazione del tempo di percorrenza del suono all'interno del tubo pieno d'acqua: dalla differenza fra i tempi misurati nel verso della corrente (t_1 in Fig. 18) e in controcorrente (t_2 in Fig. 18) si ricava la velocità del flusso dell'acqua nel tubo e, quindi, la portata.

I misuratori sono stati installati nei pozzetti della pista Armand di Limone (Fig. 19) posizionando i sensori su uno spezzone di tubo con attacchi Camlock, come quelli utilizzati dai cannoni da neve.

La sperimentazione attuata nell'inverno 2019/2020 non ha tuttavia dato risultati soddisfacenti a causa dei problemi nella registrazione dei dati misurati e del ridotto diametro dei tubi (50 mm), prossimo al limite di utilizzabilità dei sensori a ultrasuoni. Si è inoltre riscontrata una notevole difficoltà nell'assicurare il contatto dei sensori a ultrasuoni con il tubo, considerati gli spostamenti e gli urti che subisce nell'utilizzo e nel collegamento con i cannoni da neve.

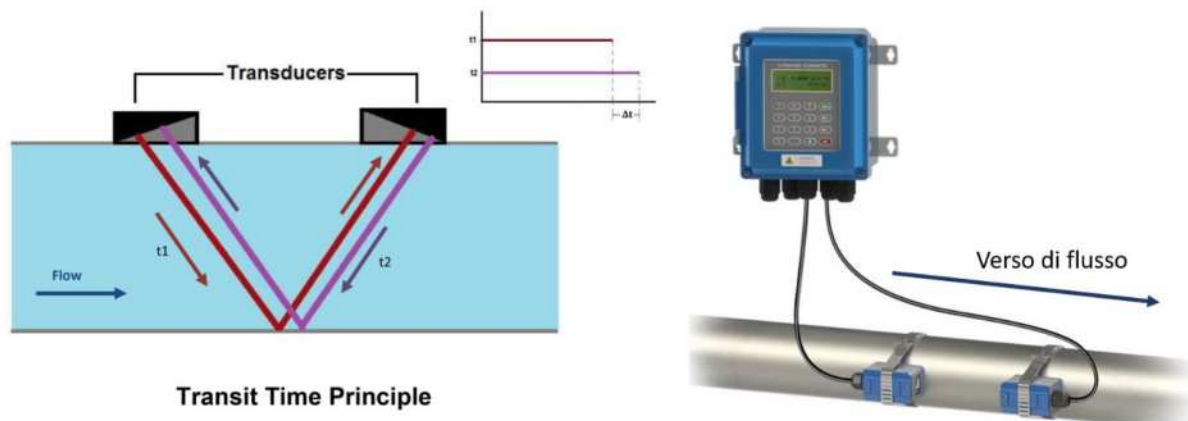


Fig. 18. Installazione di un misuratore di portata a ultrasuoni in un pozzetto di alimentazione per i cannoni da neve.



Fig. 19. Installazione di un misuratore di portata a ultrasuoni in un pozzetto di alimentazione per i cannoni da neve.

4 Iniziative di comunicazione

4.1 Evento finale SMART ALTITUDE (10-11 maggio 2021)

Nei giorni 10-11 maggio 2021 si è tenuta la conferenza finale del progetto SMART ALTITUDE (<https://www.alpine-space.org/projects/smart-altitude/en/home>), alla quale i proff. Casasso e Lingua hanno partecipato online in due eventi della prima giornata (Fig. 20).



Program overview

10 May 2021 – Ecological and tourism transition for the mountains of tomorrow: achievements and perspectives

9:00-11:20	Session 1 – The Smart Altitude project: achievements and perspectives	
9:00-9:30	Welcome words by the authorities	Secretary of State of Rural affairs (J. Giraud), Region Provence-Alpes-Côte d'Azur (C. Eymeoud), Department 05 (JM. Bernand), Les Orres (P. Vollaie)
9:30-9:40	Quick overview of the Smart Altitude project	Smart Altitude / Les Orres (Y. Bidault)
9:40-10:00	Review of Smart Altitude's Living Labs' achievements	Krvavec (J. Vidovic), Trentino Sviluppo/FBK (G. Baldessari, D. Viesi) Verbier (X. Tabin), Les Orres (Q. Daragon/P. Vollaie)
10:00-10:15	Smart Altitude's replication process: first results & perspectives	Smart Altitude: University of Milan (S. Sala), Steinbeis 2i (D. Ramette) AlpGov 2 (P. Chazaud)
10:15-10:45	Achievements of other INTERREG projects on energy transition in the Alpine Space	Feedback on the Métabief EUSALP event (O. Elvrand); insights from Alpine Space and Alcotra projects: PITER Temes Monviso Eco (H. Klinger), PITER AlpiMed (A. Casasso)
10:45-11:00	QUESTIONS & ANSWERS	
11:00-11:15	Break	
11:15-12:30	Session 2 – Expectations from professionals & territories	
11:15-12:10	Round table 1 — Socio-economic aspects and expression of the expectations of socio-professionals, the tourist industry and communities for the mountain of tomorrow	CCI Hautes-Alpes (E. Gordie), Agence de développement 05 (Y. Chaix), DSF (A. Maulin), ESF (E. Brèche), SUERA (C. Barret), EGT (F. Meignan), ANMSM (J.L. Bodh, P. Vollaie), Les 2 Alpes (C. Aubert), Bourg ST Maurice (G. Desrues), Cluster montagne (P. Grand'Eury)
12:10-12:30	QUESTIONS & ANSWERS	
12:30-13:45	Lunch Break	
13:45-16:40	Session 3 - Perspectives and action plans for the mountains of tomorrow	
13:45-13:55	Session opening: summary of previous work – Movie Smart Flexgrid Smart mountain/movie Smart Altitude	P. Vollaie (Les Orres)
13:55-15:10	Round table 2 — Climate change and technological developments for the energy & tourism transitions: views of major industrial and R&I players on the future of mountain activity	EDF (F. Busin), Orange (J. Bassaler), SFR (I. Simon), Veolia (E. Lahaye), RTE (JP. Bonnet), CEA-Tech / INES (A. Jouin), Politecnico di Torino (I. Aicardi, A. Lingua), INRAE (E. George), AMU (J.L. Lazzari)
15:10-16:40	Round table 3 — Regional, National and European plans and strategies for the ecological and tourism transitions	French Secretary of Biodiversity (B. Akiba), Alpine Committee (C. Eyméoud), Alpine regions: Provence-Alpes-Côte d'Azur (R. Muselier), Auvergne-Rhône-Alpes (F. Pannekoucke), Bourgogne-Franche-Comté (L. Lucchesi), Trentino-Alto-Adige (M. Casotto), Lombardy (L. La Rocca), Deputy of Isère (MN. Battistel), Banque des Territoires (C. Cariou)
2 &	2	
17:00-17:45	PRESS CONFERENCE	

Fig. 20. Programma della prima giornata della conferenza finale del progetto SMART ALTITUDE.

Il prof. Casasso ha tenuto una presentazione sui consumi energetici nelle stazioni sciistiche, di cui si riportano le slides in Fig. 21. Il prof. Lingua ha partecipato alla tavola rotonda sulla ricerca e sviluppo nel campo delle attività turistiche montane, alla luce dei cambiamenti climatici in corso.

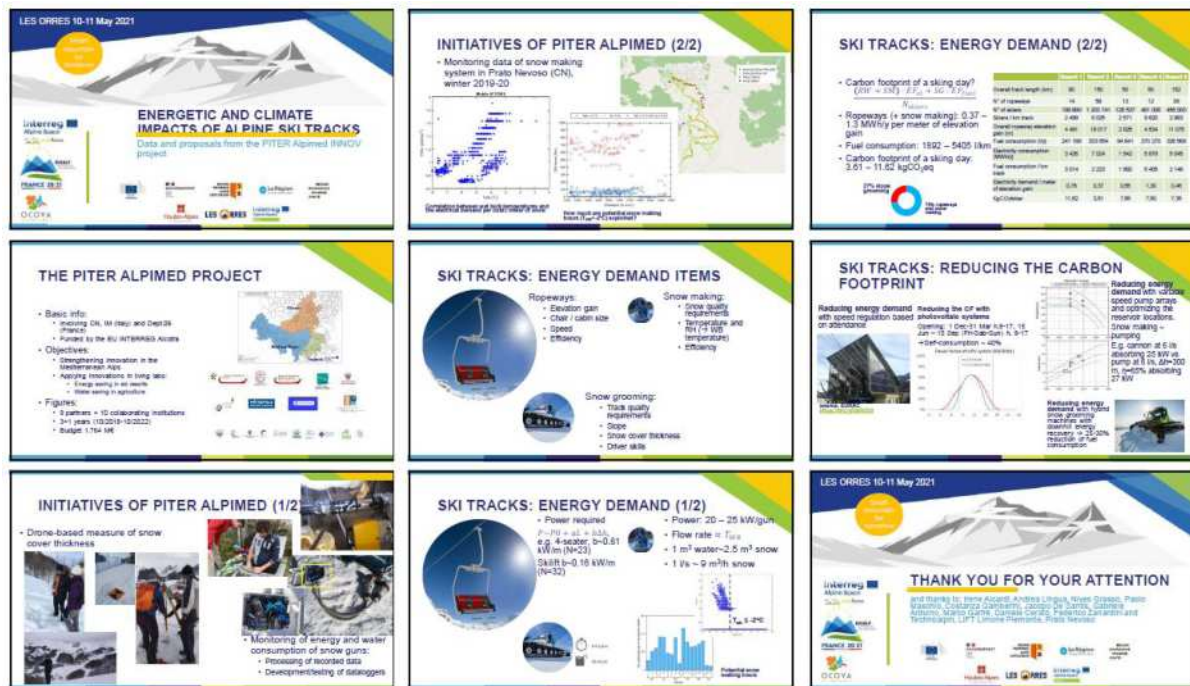
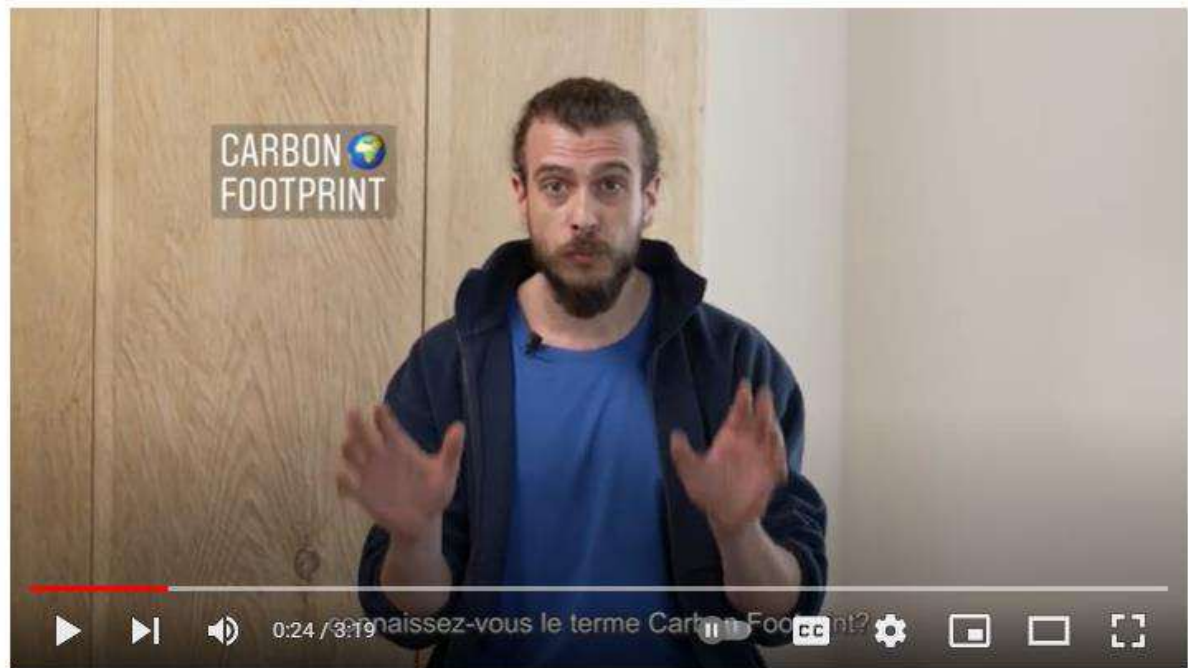


Fig. 21. Slides presentate dal prof. Casasso alla conferenza finale del progetto Smart Altitude.

4.2 Video e booklet (primavera 2022)

Nei primi mesi del 2022 sono stati prodotti un video e una guida per spiegare il concetto dell'impronta di carbonio delle piste da sci e di come ridurla. Il lavoro è stato svolto dallo studio ALF Creative di Alba (CN) sotto la supervisione della CCIAA Cuneo, con la collaborazione tecnico-scientifica del prof. Casasso (DIATI) e di CSI – Centro Servizi per l'Industria, che gestisce il servizio Cuneo Neve per le stazioni sciistiche della Provincia Granda.

Il video (Fig. 22), della durata di 3'19", è disponibile su YouTube all'indirizzo <https://youtu.be/kzFNJOIT2DE> e sul sito della CCIAA Cuneo all'indirizzo https://bit.ly/CCIAACN_CFPstazioniisci. Nel filmato si introducono il concetto di impronta di carbonio e le principali voci che la compongono (impianti di risalita, battitura delle piste e innevamento tecnico), e si forniscono suggerimenti su come i gestori delle piste e gli utenti possono collaborare a ridurla.



Carbon Footprint di una stazione sciistica



Fig. 22. Frames del video YouTube sull'impronta di carbonio delle stazioni sciistiche.

La guida (Fig. 23), composta da 28 pagine, è disponibile all'indirizzo <https://bit.ly/guidaCFPstazionisci>, approfondisce i concetti descritti nel video e presenta le iniziative portate avanti dal progetto nelle stazioni sciistiche di Limone Piemonte e Prato Nevoso.



Fig. 23. Copertina e una pagina del booklet sull'impronta di carbonio delle piste da sci.

4.3 Evento CCIAA Cuneo (28 aprile 2022)

Il 28 aprile 2022, presso la sede di CCIAA Cuneo, si è tenuta una conferenza per presentare i risultati del WP 4.1.2 del progetto PITER Alpimed INNOV. Hanno partecipato, per il Politecnico di Torino – DIATI, il prof. Casasso e il prof. Lingua, con una presentazione (Fig. 24) sui consumi energetici e l'impronta di carbonio delle piste da sci e sulle metodologie sviluppate nel progetto per caratterizzare lo spessore del manto nevoso e quindi ridurre i consumi legati alla battitura delle piste.

Un servizio sull'evento è stato trasmesso dal TG Regionale RAI del 29/04/2022, disponibile all'indirizzo https://bit.ly/20220429_TGPIemonte (minuti 4:50 - 7:08 circa).



Fig. 24. Prima pagina e una slide della presentazione dei proff. Casasso e Lingua all'evento del 28 aprile 2022.

4.4 Evento Straconi Week (Cuneo, 18 novembre 2022)

Venerdì 18 novembre 2022 presso lo Spazio CRC in via Roma 17, Cuneo, si è tenuto un evento sul rapporto tra le stazioni sciistiche e i cambiamenti climatici (Fig. 25), nell'ambito della "Straconi Week" (una settimana di incontri legata alla popolare manifestazione cuneese). Nell'ambito di questo evento, il prof. Casasso ha spiegato i concetti relativi all'impatto sul clima delle stazioni sciistiche agli studenti dell'istituto d'istruzione superiore "Sebastiano Grandis" di Cuneo.

The image contains a promotional poster for the 'Straconi Week' event and a photograph of the event itself. The poster is titled 'Special Events CUNEO® straconi' and focuses on 'CAMBIAMENTI CLIMATICI TURISMO ESORT'. It lists a series of activities from 16:00 to 17:45, including a welcome, presentations on Cuneo Neve, winter tourism projects, carbon footprint, digital transition, outdoor tourism, and a school award ceremony. The poster also mentions the organizing body 'A.S.D. il podio' and the venue 'FONDAZIONE CRC SALAINCONTRIVIA ROMA 17'. The photograph shows a large audience of students and adults seated in a hall, facing a stage where a presentation is taking place. A laptop in the foreground displays the event's website.

VENERDÌ 18 NOVEMBRE ORE 16 CUNEO

Special Events CUNEO® straconi

CAMBIAMENTI CLIMATICI TURISMO ESORT

FONDAZIONE CRC SALAINCONTRIVIA ROMA 17
www.straconi.it

Organizzazione: A.S.D. **il podio**

ore 16.00 **BENVENUTO**
Fabrizio Giall
Presidente Comitato Organizzatore Straconi

ore 16.15 **PRESENTAZIONE CUNEO NEVE**
Roberto Gesso
Presidente Cuneo Neve

ore 16.25 **SOSTEGNO AI PROGETTI DEL TURISMO INVERNALE DELLA CAMERA DI COMMERCIO DI CUNEO**
Martina Luchino
Ufficio promozione

ore 16.35 **TRANSIZIONE GREEN: IL PROGETTO CARBON FOOTPRINT DI UNA STAZIONE SCIISTICA**
Prof. Casasso
Politecnico di Torino

ore 17.00 **TRANSIZIONE DIGITALE: I PROGETTI CUNEO NEVE PASS E CUNEO NEVE STORE**
Mauro Danna
Confindustria Cuneo

ore 17.10 **TURISMO OUTDOOR LA PROMOZIONE DEL ATTRAVERSO I CAMPIONI DELLO SPORT, GLI EVENTI SPORTIVI E LE RICADUTE SUI FLUSSI TURISTICI**
Daniela Salvatrin
Direttore dell'ATL del Cuneese

ore 17.25 **L'ALTA VIA DEL SALE BEST PRACTICE DEL TURISMO OUTDOOR ESTIVO**
Armando Erbi
Direttore del Consorzio di Operatori Turistici Conibus

ore 17.45 **PREMIAZIONE SCUOLE PARTECIPANTI CONCLUSIONI E RINGRAZIAMENTI**

FONDAZIONE CRC
Camera di Commercio Cuneo
CLT METU DE
Danna Neve
ATL
Politecnico di Torino

Fig. 25. Locandina e foto dell'evento della Straconi Week del 18 novembre 2022.

4.5 Evento finale PITER Alpimed (Nizza, 6 dicembre 2022)

Nell'ambito dell'evento finale del progetto PITER Alpimed, svoltosi a Nizza il 6 dicembre 2022, il prof. Casasso ha presentato i risultati dello studio sulla carbon footprint delle stazioni sciistiche in una sessione sull'adattamento ai cambiamenti climatici (Fig. 26).

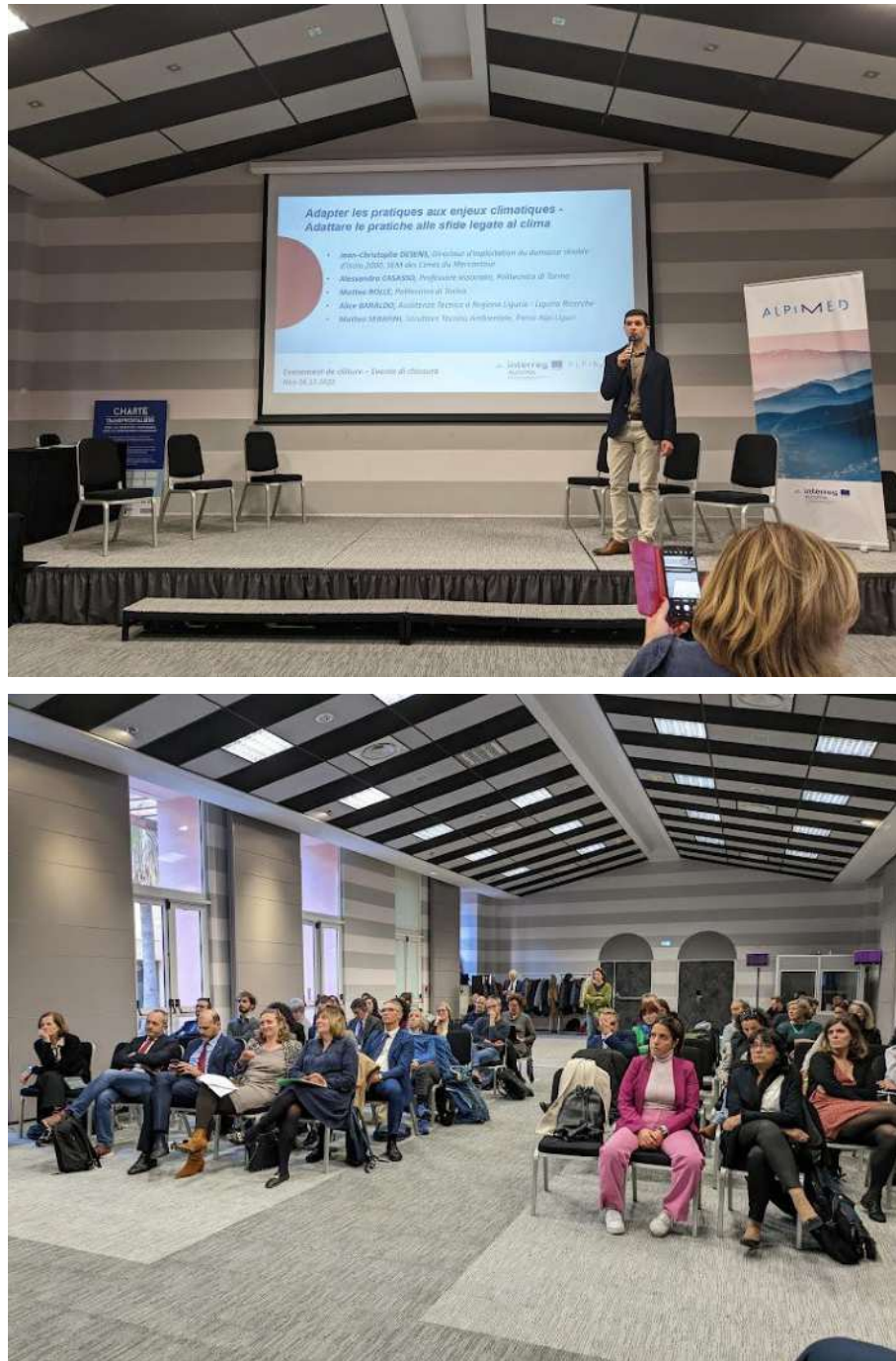


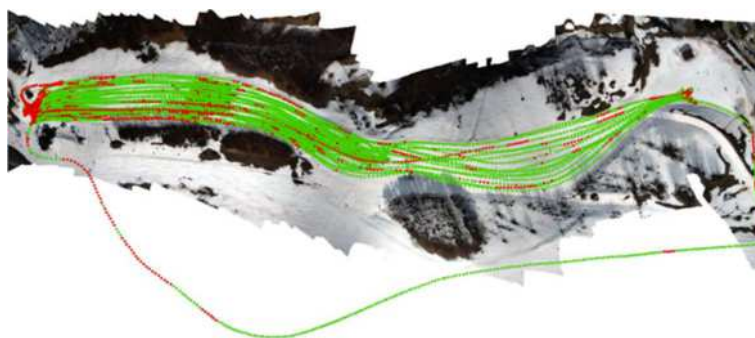
Fig. 26. Sessione sui cambiamenti climatici nell'ambito dell'evento finale del PITER Alpimed.

Bibliografia

1. De Santis, J. Carbon footprint delle stazioni sciistiche: metodi di quantificazione e ipotesi di contenimento Available online: <https://webthesis.biblio.polito.it/15645/>.
2. Skiresort service Skiresort - The World's Largest Test Portal for Ski Resorts Available online: <https://www.skiresort.info/> (accessed on 4 January 2022).
3. Noussan, M. Quanta Energia Si Consuma per Una Giornata Sugli Sci? Available online: <http://www.raccontadati.it/2019/01/energia-sci/>.
4. Smart Altitude project consortium Smart Altitude Toolkit Available online: <https://smartaltitude.eu/>.
5. Smart Altitude project consortium Smart Altitude. Alpine Winter Tourism Territories Demonstrating an Integrated Framework for a Low-Carbon, High-Impact and Resilient Future. Available online: <https://www.alpine-space.org/projects/smart-altitude/en/home>.
6. Rixen, C.; Teich, M.; Lardelli, C.; Gallati, D.; Pohl, M.; Pütz, M.; Bebi, P. Winter Tourism and Climate Change in the Alps: An Assessment of Resource Consumption, Snow Reliability, and Future Snowmaking Potential. *Mountain Research and Development* **2011**, *31*, 229–236, doi:10.1659/MRD-JOURNAL-D-10-00112.1.
7. Berard-Chenu, L.; Cognard, J.; François, H.; Morin, S.; George, E. Do Changes in Snow Conditions Have an Impact on Snowmaking Investments in French Alps Ski Resorts? *International Journal of Biometeorology* **2020**, doi:10.1007/s00484-020-01933-w.
8. Hartl, L.; Fischer, A.; Olefs, M. Analysis of Past Changes in Wet Bulb Temperature in Relation to Snow Making Conditions Based on Long Term Observations Austria and Germany. *Global and Planetary Change* **2018**, *167*, 123–136, doi:10.1016/j.gloplacha.2018.05.011.
9. Avanzi, F.; Bianchi, A.; Cina, A.; De Michele, C.; Maschio, P.; Pagliari, D.; Passoni, D.; Pinto, L.; Piras, M.; Rossi, L. Centimetric Accuracy in Snow Depth Using Unmanned Aerial System Photogrammetry and a MultiStation. *Remote Sensing* **2018**, *10*, 765, doi:10.3390/rs10050765.
10. Marino, B.G.; Masiero, A.; Chiabrando, F.; Lingua, A.M.; Fissore, F.; Błaszczak-Bak, W.; Vettore, A. Data Optimization for 3D Modeling and Analysis of a Fortress Architecture. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* **2019**, *XLII-2/W11*, 809–813, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-809-2019.
11. Goetz, J.; Brenning, A. Quantifying Uncertainties in Snow Depth Mapping From Structure From Motion Photogrammetry in an Alpine Area. *Water Resour. Res.* **2019**, *55*, 7772–7783, doi:10.1029/2019WR025251.
12. Turner, D.; Lucieer, A.; Watson, C. An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Remote Sensing* **2012**, *4*, 1392–1410, doi:10.3390/rs4051392.
13. Cina, A.; Dabove, P.; Manzino, A.M.; Piras, M. Augmented Positioning with CORSs Network Services Using GNSS Mass-Market Receivers. In Proceedings of the 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS 2014; IEEE: Monterey, CA, USA, May 2014; pp. 359–366.

INTERREG ALCOTRA 2014-2020 Projet “PITER Alpimed – INNOV”

Rapport d'activité WP 4.1.2 (économies d'énergie dans les stations de ski)



PROMOTEUR :



**Camera di Commercio, Industria, Artigianato e
Agricoltura (CCIAA) di Cuneo**
Via Emanuele Filiberto 3
12100 Cuneo

RÉDACTION :



Politecnico di Torino – DIATI
Corso Duca degli Abruzzi 24
10129 Torino

Ing. Irene Aicardi
Prof. Alessandro Casasso
Ing. Nives Grasso
Prof. Andrea Lingua

Sommaire

Avant-propos	3
1 Étude sur la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre dans les stations de ski 3	
1.1 Thèse de doctorat (Jacopo De Santis).....	3
1.2 Analyse des données de la station de ski de Prato Nevoso.....	8
2 Développement de techniques de mesure de l'épaisseur du manteau neigeux	13
2.1 Mesures avec des images de drone.....	15
2.2 Misure con tracciamento GNSS su mezzi battipista	Errore. Il segnalibro non è definito.
3 Développement d'un équipement pour la surveillance des canons à neige	26
4 Initiatives de communication.....	29
4.1 Événement final SMART ALTITUDE (10-11 mai 2021)	29
4.2 Vidéo et brochure (printemps 2022)	30
4.3 Événement CCIAA Cuneo (28 avril 2022).....	33
4.4 Événement Straconi Week (Cuneo, 18 novembre 2022).....	34
4.5 Événement final PITER Alpimed (Nice, 6 décembre 2022)	35
Bibliographie	36

Avant-propos

Le présent rapport décrit brièvement les activités de recherche menées dans le cadre du projet PITER Alpimed - INNOV par le Politecnico di Torino - DIATI, en tant que délégataire du chef de file de la Chambre de Commerce, d'Industrie, d'Artisanat et d'Agriculture (CCIAA) de Cuneo.

Les activités réalisées sont encadrées par les WP 4.1.2 (économie d'énergie dans les stations de ski) et WP 4.1.3 (économie d'eau), dirigés par le Prof. Alessandro Casasso et l'Ing. Irene Aicardi (qui a ensuite été remplacée par le Prof. Andrea Lingua).

La rédaction de ce document, qui concerne le WP 4.1.2, a été confiée au professeur Alessandro Casasso et à l'ingénieur Nives Grasso. L'ingénieur Jacopo De Santis (étudiant en thèse), l'ingénieur Vincenzo di Pietra (chercheur), l'ingénieur Costanza Gamberini (chargée de recherche en 2019-2020) et l'ingénieur Paolo Maschio (technicien de laboratoire) ont également contribué aux activités.

Le rapport suivant est composé de 4 chapitres concernant les trois activités principales du Politecnico di Torino - DIATI dans le WP 4.1.2 et les activités de communication :

- L'étude des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre dans les stations de ski, visant à déterminer leurs ordres de grandeur et les principales mesures pour les réduire (Ch. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) ;
- Le développement de techniques géomatiques de mesure de l'épaisseur du manteau neigeux, visant à optimiser le damage des pistes et la fabrication de neige (Ch. 0) ;
- Le développement et l'essai d'instruments de mesure de la puissance électrique et du débit d'eau absorbés par les canons à neige, en vue d'une utilisation future pour les audits et le remplacement éventuel des machines obsolètes (Chap. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).
- Le chapitre **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** présente les activités de communication liées au WP 4.1.2, auquel le Politecnico di Torino - DIATI a participé.

1 Étude sur la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre dans les stations de ski

1.1 Thèse de doctorat (Jacopo De Santis)

Les stations de ski sont souvent présentées, par les journaux et les blogs, comme une activité touristique à forte consommation d'énergie et à fort impact environnemental. Cependant, la contribution du ski (en particulier du ski alpin) aux économies de montagne est indéniable et il est

donc important d'évaluer l'impact environnemental de cette activité et de comprendre comment cet impact peut être réduit.

Le Polytechnique de Turin a traité ce sujet avec une thèse de doctorat en ingénierie environnementale et territoriale (candidat : Jacopo De Santis) qui a été discutée lors de la session d'octobre 2020 et qui est disponible à l'adresse indiquée dans la bibliographie [1]. Pour plus de détails, veuillez vous référer à la thèse, qui est accessible au public (URL dans la bibliographie).

La thèse a d'abord abordé les trois principaux postes de consommation d'énergie d'une station de ski, à savoir les remontées mécaniques, les équipements de fabrication de neige et le damage des pistes. En ce qui concerne les remontées mécaniques, une étude menée sur une base de données de plus de 100 remontées mécaniques a identifié une corrélation entre la différence de hauteur Δh (m), la longueur Δx (m) et la puissance absorbée P (kW) :

$$P = p_0 + a \cdot \Delta h + b \cdot \Delta x \quad (1)$$

Cette corrélation a des valeurs différentes pour chaque type (télésièski, télésiège 2 places, télésiège 4 places, etc.), comme le montre le Tableau 1. Paramètres de l'équation (1) pour différents types de remontée mécanique., tandis que la Fig. 1. Exemple de corrélation entre la différence de hauteur et de longueur d'une remontée mécanique et la consommation d'énergie.

montre un exemple de nuage de points en 3 dimensions.

Les corrélations obtenues donnent une idée approximative de la puissance absorbée par les remontées mécaniques et des facteurs qui influencent cet indicateur important : tant la différence de hauteur que la longueur de la remontée mécanique jouent un rôle significatif.

CABINOVIA 10 POSTI AD AMMORSAMENTO AUTOMATICO (GD10)

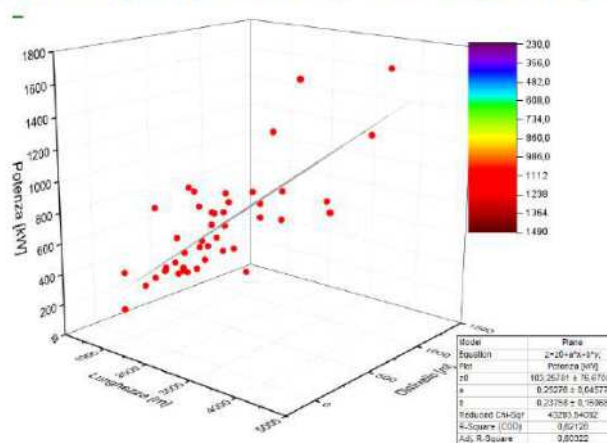


Figura 10: Fitting in due variabili per una cabinovia 10 posti ad ammorsamento automatico.

Fig. 1. Exemple de corrélation entre la différence de hauteur et de longueur d'une remontée mécanique et la consommation d'énergie.

Tableau 1. Paramètres de l'équation (1) pour différents types de remontée mécanique.

Type	p_0 (kW)	a (kW/m)	b (kW/m)	N	R^2
Skilift	6.881 ± 82.349	0.042 ± 0.022	0.163 ± 0.082	32	0.779
Télésiège 4 places	113.944 ± 82.349	-0.043 ± 0.076	0.812 ± 0.285	23	0.388
Télésiège 6 places	140.098 ± 87.164	0.101 ± 0.075	0.621 ± 0.233	20	0.555
Télésiège 8 places	76.230 ± 105.351	0.207 ± 0.157	0.712 ± 0.478	13	0.658
Télésiège 10 places	103.258 ± 76.670	0.253 ± 0.045	0.238 ± 0.161	45	0.621

En ce qui concerne la fabrication de la neige, ce poste de consommation doit être subdivisé en plusieurs éléments :

- Machines à neige
- Refroidisseurs pour le refroidissement de l'eau
- Pompes pour systèmes de relevage

Cependant, la consommation d'énergie pour la fabrication de la neige est relativement faible par rapport à celle des remontées mécaniques. Si la puissance consommée par le téléski et le système d'enneigement sont en fait comparables, le premier fonctionne quelques centaines d'heures par an, tandis que le second fonctionne quelques dizaines d'heures par an.

Enfin, le damage des pistes utilise des moyens caractérisés par une consommation de 20-25 L/h de diesel. Il est très difficile de donner une indication du temps nécessaire au damage, car celui-ci augmente en fonction du nombre de chutes de neige et de la quantité tombée, de la pente de la piste, de l'irrégularité du fond, etc.

Une estimation de la consommation d'énergie nécessaire pour les remontées mécaniques et les équipements d'enneigement (électricité) et pour le damage (diesel) a été réalisée en utilisant un certain nombre de bilans annuels de stations de ski dans lesquels ces données étaient mentionnées, parfois avec les quantités exactes, parfois avec les montants dépensés (desquels les quantités ont été déduites en utilisant les prix de la saison d'hiver correspondante).

Dans ces bilans, les chiffres de fréquentation saisonnière totale (forfaits journée vendus ou passages d'abonnés) étaient également disponibles, tandis que les données relatives à la longueur totale des pistes et à la différence de hauteur totale des remontées mécaniques ont été obtenues sur le site web de Skiresort [2]. Ces dernières données ont été utilisées pour dériver 3 indicateurs :

- La consommation moyenne en chaque saison pour damer 1 km de piste (L/km) ;
- La consommation moyenne en chaque saison des remontées mécaniques, par mètre de dénivelé (MWh/m) ;
- Les émissions moyennes de gaz à effet de serre (kgCO₂eq/entrée) par entrée sur les pistes.

Le Tableau 2 et le Tableau 3 présentent les résultats de cette estimation pour les saisons 2018/19 et 2017/18, respectivement. Les valeurs des trois indicateurs sont comprises entre 1892 et 2861 L/km de piste, 0,306 et 1,30 MWh/m de dénivelé, et entre 3,11 et 11,62 kgCO₂eq/km.

Ces fourchettes sont assez larges mais présentent peu de variations entre les saisons. Les émissions par habitant les plus faibles sont enregistrées dans le domaine skiable qui compte le plus d'entrées, ce qui peut être attribué aux économies d'échelle qui permettent de réduire le rapport entre le nombre d'entrées et le dénivelé total des remontées, ce qui les fait fonctionner à un taux de remplissage plus élevé.

La consommation de carburant par km de piste est un indicateur qui pourrait être trompeur, tant en raison des différents critères utilisés pour calculer les km de piste que parce qu'il faudrait connaître la largeur, qui peut varier considérablement. À cela s'ajoute la différence importante entre la consommation nécessaire pour battre 1 km de piste facile et 1 km de piste difficile : cet indicateur pénalise donc les domaines skiables aux pistes plus difficiles.

Cependant, les données présentées sont en ligne avec les quelques études similaires disponibles dans la littérature [3].

Tableau 2. Résultats de l'analyse sur la consommation et les émissions de gaz à effet de serre dans 5 stations de ski, lors de la saison 2018/2019.

	I caso studio	II caso studio	III caso studio	IV caso studio	V caso studio
Km di piste	80	150	50	50	152
n. impianti di risalita	14	58	13	12	38
n. sciatori in una stagione	199 890	1 203 741	128 537	481 000	455 000
n. sciatori/km di pista	2 499	8 025	2 571	9 620	2 993
Dislivello complessivo degli impianti di risalita (m)	4 491	19 017	2 825	4 534	11 075
Carburante consumato (l)	241 188	333 554	94 641	270 270	326 568
Elettricità consumata (MWh)	3 426	7 024	1 542	5 878	5 045
Litri di carburante/ km di pista	3 014,85	2 223	1 892	5 405	2 148,47
MWh consumati/m di dislivello	0.763	0.369	0.546	1.30	0.455
KgCO ₂ /sciatore	11,62	3,61	7,85	7,50	7,35

Tableau 3. Résultats de l'analyse sur la consommation et les émissions de gaz à effet de serre dans 5 stations de ski, lors de la saison 2017/2018.

	I caso studio	II caso studio	III caso studio	IV caso studio	V caso studio
Km di piste	80	150	50	50	152
n. impianti di risalita	14	58	13	12	38
n. sciatori in una stagione	180 390	1 180 303	136 522	484 000	383 000
n. sciatori/km di pista	2 254	7 868	2 730	9 680	2 519
Dislivello complessivo degli impianti di risalita (m)	4 491	19 017	2 825	4 534	11 075
Carburante consumato (l)	200 261	290 892	139 813	293 050	273 924
Elettricità consumata (MWh)	2 986	5 834	1 377	5 416	4 411
Litri di carburante/ km di pista	2 503	1 939	2 796	5 861	1 802
MWh consumati/m di dislivello	0.66	0.306	0.546	1.19	0.39
KgCO ₂ /sciatore	11.15	3.11	7.70	7.16	7.61

Le chiffre intéressant concerne la large gamme d'émissions de gaz à effet de serre par entrée en piste (3,11-11,62 kgCO₂eq/personne), ce qui est également conforme aux résultats du projet européen Smart Altitude [4,5] : pour fournir un terme de comparaison, c'est comparable à la conduite de 30 à 120 km dans une petite voiture.

La thèse traite ensuite des mesures visant à réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre dans les stations de ski :

- Installation de systèmes photovoltaïques sur les bâtiments de départ, d'arrivée et intermédiaires des remontées mécaniques : les surfaces de ces bâtiments sont souvent suffisantes pour couvrir un pourcentage appréciable de la puissance électrique nécessaire, et le profil d'utilisation de la structure (qui fonctionne de jour) est idéal pour maximiser l'autoconsommation ;
- Installation de systèmes de régulation de la vitesse des remontées mécaniques, qui peut être réduite en dehors des heures de pointe ;
- Optimisation des systèmes de pompage, en utilisant des combinaisons de pompes en série et en parallèle contrôlables par un onduleur, afin de pouvoir répondre à des exigences de débit et de hauteur de charge très variables ;
- Utilisation de dameuses hybrides ;
- Utilisation de systèmes de surveillance de l'épaisseur de la neige sous le véhicule de damage et de suivi GNSS en direct, afin d'optimiser les passages des véhicules et de réduire les kilomètres parcourus.

1.2 Analyse des données de la station de ski de Prato Nevoso

Les données des lances et des ventilateurs (" canons ") installés dans la station de ski de Prato Nevoso, dont la disposition est indiquée sur la carte de la Figure 2, pendant la saison de ski 2019/20 ont été analysées. Au total, on compte environ 147 lances dans la station de ski de la région de Mondovì, dont 20 sur la piste Prel (Fig. 3), qui fait l'objet des relevés par drone décrits au chapitre **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, et 8 ventilateurs qui sont tournés entre les différentes pistes.

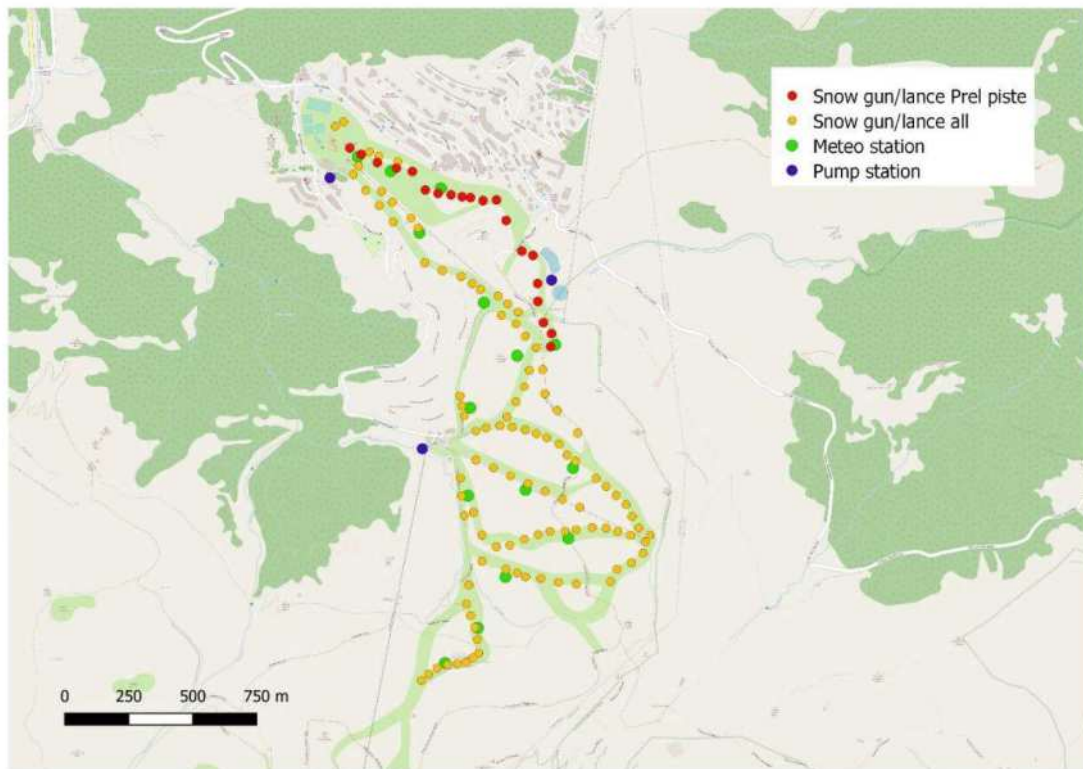


Figure 2. Station de ski de Prato Nevoso (CN), lances et canons à neige (rouge), stations de pompage (bleu), stations météo (vert).



Fig. 3. Lances et canons pour l'enneigement de la piste Prel.

Les données vont du 5 novembre au 1er mars, car la fermeture de COVID a alors eu lieu.

Pour des raisons de commodité, ils ont été divisés en 12 décades (n° 1 : 5 novembre - 14 décembre ; n° 2 : 15 novembre - 24 novembre ; n° 3 : 25 novembre - 4 décembre ; n° 4 : 5 décembre - 14 décembre ; n° 5 : 15 décembre - 24 décembre ; n° 6 : 25 décembre - 3 janvier ; n° 7 : 4 janvier - 13 janvier ; n° 8 : 14 janvier - 23 janvier ; n° 9 : 24 janvier - 2 février ; n° 10 : 3 février - 12 février ; n° 11 : 13 février - 22 février ; n° 12 : 23 février - 1er mars). Les graphiques ci-dessous utilisent donc cette convention de représentation. La Figure 4 montre la distribution des heures de fonctionnement cumulées de toutes les machines en service sur la piste Prel, montrant que le système d'enneigement a été mis en service principalement entre 5 heures et 15 heures.

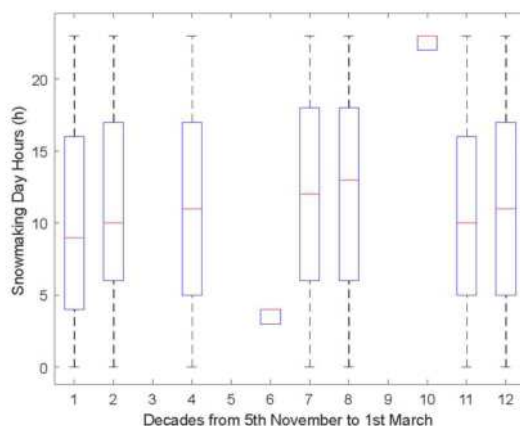


Figure 4. Heures dominantes d'utilisation des machines à neige, sur la piste Prel.

La Figure 5 montre le nombre total d'heures de fonctionnement des lances et des ventilateurs pour chaque décade. Ces données (barres vertes) ont été comparées à la température du bulbe humide (fonction de la température et de l'humidité relative de l'air) pour vérifier que la condition conventionnellement utilisée, c'est-à-dire $T_{wb} < -2^{\circ}\text{C}$, était toujours respectée.

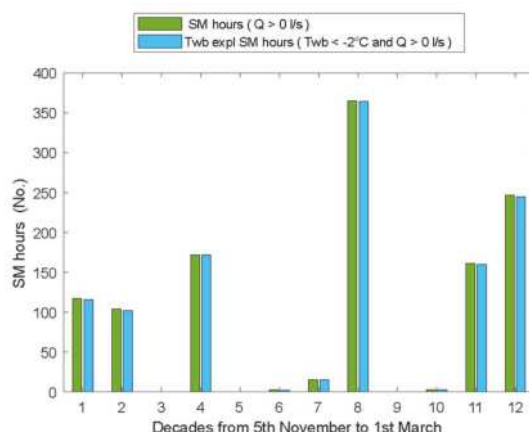


Figure 5. Heures totales de fonctionnement des enneigeurs de la station de ski de Prato Nevoso. En vert, les heures de fonctionnement indépendamment de la température, en bleu les heures de fonctionnement avec $T_{wb} < -2^{\circ}\text{C}$.

La Figure 6 montre la comparaison entre les heures réelles de fonctionnement des systèmes d'enneigement et les heures disponibles pour l'enneigement, appelées "potential snowmaking hours", qui, comme mentionné ci-dessus, sont toutes les heures pendant lesquelles la température du bulbe humide est inférieure à -2°C . On constate qu'en 2019/2020, il restait une marge résiduelle assez importante pour poursuivre l'enneigement technique. L'autre facteur limitant, en plus de la température atmosphérique, est la disponibilité de l'eau dans les petits réservoirs (Figure 7).

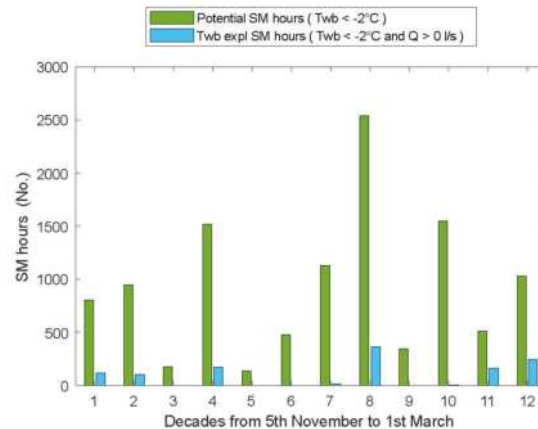


Figure 6. Comparaison des heures réelles de fonctionnement des enneigeurs (en bleu clair) avec les heures potentielles d'enneigement (potential snowmaking hours, en vert).



Figure 7. Lacs d'enneigement de Prato Nevoso, avec des volumes respectifs de 27 mille mètres cubes (à gauche) et 11 mille mètres cubes (à droite).

En ce qui concerne l'analyse des performances des enneigeurs, la Figure 8 montre la corrélation entre la température du bulbe humide (en abscisse) et le débit d'eau traité par un ventilateur (en ordonnée). Il est évident que des températures plus froides permettent de traiter un débit plus important et, par conséquent, des rendements horaires plus élevés. En effet, avec un air plus froid, il est possible de mélanger davantage d'eau à l'air comprimé tout en parvenant à obtenir la formation de "sphères" de glace qui reproduisent la neige naturelle. Un autre paramètre à prendre en compte, et qui n'est malheureusement pas visible sur le graphique, est le réglage de la qualité de la neige : pour le " fond " de la piste à placer sur la prairie non enneigée, un rapport eau/air comprimé plus élevé peut être utilisé, ce qui donne une neige plus " lourde " et plus humide ; pour le haut, sur lequel les skieurs vont passer, un rapport eau/air comprimé plus faible est nécessaire (à la même température de bulbe humide) et donc le rendement horaire est réduit.

Sachant que la densité de la neige technique est d'environ 400 kg/m³, 2,5 m³ de neige sont produits par mètre cube d'eau. Avec un débit maximal d'environ 12-14 m³/h d'eau, il est donc possible

d'obtenir environ 30-35 m³/h de neige avec chaque machine. Si l'on considère que l'absorption typique d'un ventilateur est d'environ 20-25 kW, on peut en déduire que la consommation d'énergie pour produire 1 m³ de neige est d'au moins 0,6-0,7 kWh ; les valeurs les plus typiques sont de l'ordre de 1-2 kWh/m³. A ces valeurs, il faut ajouter la consommation d'énergie pour le pompage, qui porte le total à 1,5 - 9 kWh/m³ de neige [6].

Cependant, le graphique de la figure 8 met en évidence le lien très fort entre la température du bulbe humide et la capacité, ainsi que l'efficacité, de la production de neige technique. La tendance au réchauffement climatique n'affecte pas seulement les chutes de neige naturelles, mais aussi les heures potentielles d'enneigement (le "potential snowmaking hours"), la capacité à produire suffisamment de neige pendant ces heures et l'efficacité énergétique du processus [7,8].

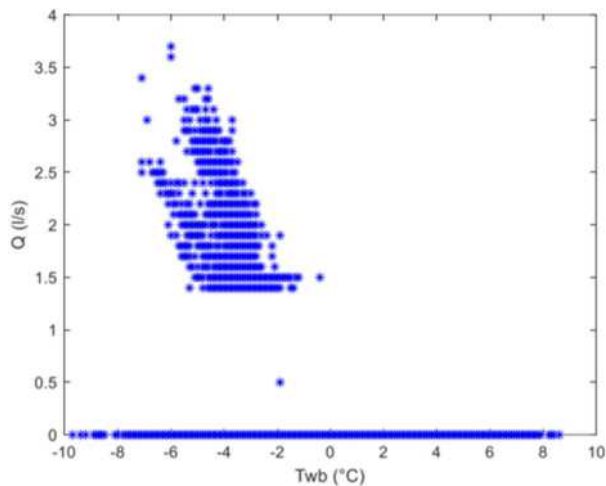


Figure 8. Débit d'eau traité par un canon à neige, en fonction de la variation de la température du bulbe humide.

2 Développement de techniques de mesure de l'épaisseur du manteau neigeux

Les développements récents des technologies géomatiques, en particulier les drones (Unmanned Aerial Vehicles) et les récepteurs GNSS (Global Navigation Satellite Systems), offrent des opportunités intéressantes pour optimiser la production de neige technique. Avec l'émergence de technologies bien établies dans le domaine de la mesure et de la surveillance, les techniques de mesure manuelle typiques sont de plus en plus remplacées par de nouvelles méthodologies impliquant l'utilisation de données SAR et de télédétection optique, de scanners laser terrestres (TLS), de levés géoradar (GPR) et de techniques de photogrammétrie à partir de drones (Unmanned Aerial Vehicles) ou terrestres, grâce également à la petite taille des capteurs qui leur permet d'être installés dans divers dispositifs [9]. La photogrammétrie et les algorithmes de Structure from Motion (SFM) sont des techniques de plus en plus utilisées dans divers domaines d'application. À cet égard, le groupe de géomatique de l'université polytechnique de Turin a proposé leur utilisation pour l'analyse de l'épaisseur du manteau neigeux dans les environnements alpins.

Par rapport aux autres techniques mentionnées, la photogrammétrie par drone permet la reconstruction tridimensionnelle de l'objet d'étude avec une bonne précision et un niveau de détail élevé [10], ainsi que la suppression des zones cachées/ombragées pendant la phase de relevé, qui caractérisent principalement les techniques de relevé terrestre (par exemple TLS), en raison de la présence de zones inaccessibles depuis le sol. De plus, cette technique est particulièrement efficace pour le suivi, flexible et facilement répétable, permettant une réduction significative du temps d'acquisition. Évidemment, l'utilisation des appareils sans pilote nécessite également de précautions différentes en fonction des conditions météorologiques, telles que la présence de vents forts ou de perturbations.

L'Université Polytechnique de Turin a donc entrepris d'étudier et de valider une méthodologie d'estimation de l'épaisseur du manteau neigeux à travers la génération de cartes de hauteur de neige, qui sont calculées au moyen de la différence entre deux modèles altimétriques (DEM) créés pour la même zone d'étude, l'un relatif aux acquisitions au sol sans présence de neige et l'autre sur le manteau neigeux [11].

Parallèlement, l'utilisation de capteurs GNSS pour le suivi des dameuses a été évaluée afin de surveiller leurs parcours et d'améliorer la modélisation des pentes en réduisant la consommation de carburant. À ce jour, la plupart des fabricants de dameuses sont en mesure d'installer des capteurs qui leur permettent de suivre la trajectoire des véhicules ainsi que d'estimer la hauteur du manteau neigeux en temps réel. Toutefois, l'accès aux données n'est possible qu'au moyen d'abonnements très coûteux que les petits domaines skiables, notamment, ne pourraient pas couvrir. De nombreux types de

récepteurs GNSS sont actuellement disponibles sur le marché, allant des récepteurs géodésiques à triple fréquence et multi-constellation aux récepteurs à fréquence unique et mono-constellation, avec différentes gammes de prix. Les récepteurs bifréquences à faible coût peuvent utiliser les deux fréquences (L1 et L2) pour éliminer les erreurs dues aux conditions atmosphériques (par exemple, l'ionosphère) et environnementales (par exemple, les trajets multiples), ce qui permet d'obtenir une précision de positionnement de l'ordre du centimètre. En outre, la petite taille des antennes et des récepteurs GNSS permet de les installer sur tout type de véhicule, ce qui en fait une excellente solution pour le suivi des dameuses.

Les paragraphes suivants décrivent les activités et les tests réalisés pour atteindre les objectifs du projet, concernant l'estimation de l'épaisseur de la neige et le suivi des itinéraires des dameuses.

Les essais d'acquisition de données topographiques et photogrammétriques ont été réalisés sur deux zones d'étude différentes. La première est une piste noire, appelée Pista Armand (ALP), dans le territoire de Limone Piemonte, qui présente les caractéristiques suivantes : altitude minimale 1396 m, altitude maximale 1582 m, pente moyenne 33%, exposition E (Figure 9).



Figure 9. Zone d'étude à Limone Piemonte (CN) : la piste "Armand" à 1400 mètres au-dessus du niveau de la mer..

La deuxième étude de cas est une piste bleue, Prél (PPN), qui fait partie du domaine skiable de Prato Nevoso et qui présente les caractéristiques suivantes : altitude minimale 1456 m, altitude maximale 1678 m, pente moyenne 17%, exposition SE (Figure 10).



Figure 10. Zone d'étude à Prato Nevoso (CN) : la piste Prèl.

2.1 Mesures avec des images de drone

L'acquisition de données photogrammétriques sur les pistes de ski peut être assez critique. Cela est dû non seulement aux caractéristiques de l'environnement, telles que la pente du terrain et la présence de végétation, mais aussi à la présence d'éléments anthropiques, tels que les bâtiments en bordure de piste et les remontées mécaniques. Un aspect qui complique encore l'acquisition pendant la période hivernale est la présence massive de skieurs, tant sur la piste que dans les zones environnantes. Il faudrait également tenir compte de la façon dont les basses températures affectent la durée de vie des piles des capteurs utilisés.

Différentes solutions commerciales ont donc été choisies pour effectuer les tests, en fonction du contexte (végétation, espace de décollage et d'atterrissage), des aspects opérationnels (présence de personnes sur la pente) et des conditions météorologiques (présence de vent).

Le Tableau 4 présente les systèmes de drones choisis pour acquérir les données et leurs caractéristiques.

Tableau 4. Spécifications des plateformes de drones utilisées.

	DJI Phantom 4 Pro	DJI Mavic 2 Pro	DJI Mavic Mini
Poids au décollage	1388 g	907 g	249 g
Autonomie de vol	30 minutes	31 minutes	30 minutes
Distance de vol	14 Km	18 Km	16 Km
Capteur	CMOS da 1" 20 MP	CMOS da 1" 20 MP	CMOS da 1/2,3" 12 MP
Longueur focale de l'appareil photo	24 mm f/2.8-11	28mm f/2.8-11	24 mm f/2.8

Trois relevés aériens ont été effectués pour chaque piste de ski

- un pour mesurer l'altitude de référence du terrain en l'absence de neige, pendant la saison été/automne ;
- deux autres vols ont été effectués pendant la saison de ski pour mesurer l'épaisseur de la neige et valider la procédure.

Afin de couvrir l'ensemble de la zone d'étude tout en conservant une bonne visibilité du drone, les pistes ont été divisées en plusieurs parties avec un dénivelé maximal de 60 mètres. En outre, afin de renforcer le calcul du bloc photogrammétrique, compte tenu de l'inclinaison du terrain, les données ont été acquises pour chaque vol en survolant à la fois des rampes avec la caméra en position nadirale et des rampes avec une caméra oblique (inclinaison d'environ 30 degrés, correspondant approximativement à celle de la pente) (Aicardi et al. ., 2016a ; Lingua et al., 2017).

En fonction de la plateforme du drone utilisée et du capteur optique à bord, les vols ont été effectués à une hauteur garantissant une distance d'échantillonnage au sol (GSD) moyenne (taille du pixel au sol) d'environ 2 cm. Les principales caractéristiques des vols effectués sont décrites dans le Tab. 5.

Tab. 5. Caractéristiques des vols effectués.

La zona	Persone in pista	UAV	N. immagini	Media GSD [cm/px]
ALP Niente neve	No	Phantom 4 Pro	1906	1,51
ALP snow-I test	No	Phantom 4 Pro	741	1.81
ALP neve-II test	sì	Mavic Mini	937	2.02
PPN Nessuna neve	No	Mavic 2 Pro	1096	1.41
PPN neve-I test	sì	Mavic Mini	553	1.92
PPN neve-II test	sì	Mavic Mini	721	2.43

Pendant tous les essais, des points de contrôle au sol (GCP) et des points de vérification (CP) ont été utilisés pour optimiser la construction du bloc photogrammétrique, géoréférencer le modèle et valider la précision du résultat final. Avant les vols, des panneaux plastifiés (40x40 cm) ont été placés dans la zone d'étude. Compte tenu de la nécessité d'assurer la sécurité des skieurs, la piste de ski ne pouvant être fermée au public pendant l'hiver, sauf pour quelques minutes, les balises ont été placées uniquement sur les côtés extérieurs de la piste, sur de la neige non damée, et fixées avec des clous. La position des marqueurs a été acquise avec un récepteur GNSS, en utilisant une approche RTK (via une connexion Internet GSM pour recevoir les corrections) (Figure 11). Les coordonnées de ces points ont été estimées avec une précision centimétrique (3 cm) et des ambiguïtés fixées pour tous les points.



Figure 11. Mesure du GCP avec l'approche RTK.

En outre, un réseau topographique a été créé à Limone Piemonte en matérialisant deux sommets et en les mesurant avec un récepteur géodésique GNSS en mode statique. Les coordonnées des points ont été estimées à l'aide des données de la station permanente de Mondovì, du réseau CORS (Continuously Operation Reference Stations) de la région du Piémont, et une précision de l'ordre du millimètre a été obtenue. Par la suite, certains points photographiques clairement visibles depuis les vols de drones ont été mesurés avec une station totale positionnée sur les sommets de référence (Figure 12).



Figure 12. Levé de détail avec la station totale.

L'objectif des acquisitions d'images aériennes était de produire des modèles numériques de terrain (MNT) des pistes de ski en présence et en l'absence de neige, pour l'estimation de l'épaisseur de la neige. Les données du drone provenant des six acquisitions ont été traitées à l'aide de l'approche Structure from Motion (SfM) [12].

Ces algorithmes sont désormais mis en œuvre dans plusieurs logiciels commerciaux et conduisent tous à l'alignement d'images, à la génération de nuages de points 3D denses et, par la suite, à la production d'un maillage triangulé, de modèles numériques d'élévation (MNE) et à l'extraction d'orthophotos. Dans cette étude de cas, le processus photogrammétrique a été réalisé en utilisant la solution commerciale AMP (Agisoft Metashape Professional). Pour chaque ensemble de données, les images nadirales et obliques ont été traitées ensemble. Le logiciel a été réglé pour aligner les images avec une précision "élevée", c'est-à-dire en utilisant les images dans leur taille originale. Pour géoréférencer le bloc photogrammétrique et améliorer l'estimation de l'orientation extérieure, plusieurs GCP ont été collimatés sur les photos, tandis que certains CP ont été utilisés pour valider la précision du modèle (

Tableau 6). Des nuages de points 3D denses avec un haut niveau de détail ont ensuite été produits. Après la phase d'orientation (Bundle Block Adjustment), les nuages de points denses ont été calculés par les différents algorithmes implémentés et ont donné lieu à des produits adaptés aux représentations à grande échelle (Tableau 7).

Tableau 6. Résolution d'image et cibles mesurées pour le géoréférencement du modèle et l'estimation de la précision.

set di dati	Ris. immagine [px]	N. GCP	N. CP
ALP Niente neve	5472 x 3648	41	14
ALP snow- I test	5472 x 3648	10	5
ALP neve- II test	4000 x 2250	13	10
PPN Nessuna neve	5472 x 3648	36	12
PPN neve- I test	4000 x 2250	28	10
PPN neve- II test	4000 x 2250	34	10

Tableau 7. Résidus de CP sur les nuages de points denses résultants.

Dataset	Residui sui CP [mm]			N. punti della nuvola densa [Milioni di punti]
	X	Y	Z	
ALP Niente neve	14	18	27	350
ALP snow- I test	11	10	13	77
ALP neve- II test	23	19	50	85
PPN Nessuna neve	27	19	43	103
PPN neve- I test	15	29	19	119
PPN neve- II test	11	22	42	93

Les résultats de ces opérations sont des nuages de points denses, qui décrivent à la fois le terrain et les objets situés au-dessus (par exemple, la végétation, les bâtiments, les remontées mécaniques, etc.) Selon les données acquises, les nuages de points obtenus offrent des modèles 3D complets des pistes de ski. En général, le niveau de bruit des nuages de points denses est plutôt faible, seules quelques zones, au-delà des limites du versant Armand, sont perturbées par la présence de végétation. La seule exception est le premier test effectué sur la piste Armand en présence de neige. Au cours de la phase d'enquête, en raison de l'évolution rapide des conditions météorologiques, les images de la partie inférieure de la pente ont été acquises dans des conditions de lumière uniforme. L'absence d'ombres et l'uniformité du manteau neigeux travaillé par la dameuse ont empêché les algorithmes de GDF d'identifier des points homologues. Dans cette circonstance, bien que les résidus sur GCP et CP étaient acceptables, le nuage dense était visiblement très bruyant dans cette zone et cela conduirait à une estimation incorrecte de l'épaisseur. Différents tests ont été effectués sur les images : en plus de la balance des blancs, le filtre de Wallis a été appliqué, en faisant varier chaque fois les différents paramètres (par exemple la taille de la fenêtre, le contraste, etc.). Les résultats obtenus n'étaient cependant pas satisfaisants et il a été décidé de ne traiter que les images relatives à la partie supérieure de la piste, acquises à la lumière du soleil.

Le filtrage de ces informations et l'obtention d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) étaient indispensables pour réaliser des analyses du comportement des sols. L'AMP a ensuite été utilisé pour classifier les points au sol en utilisant une approche automatique. La procédure de classification automatique implique une approximation initiale du modèle de terrain à partir des points les plus bas relevés. Ensuite, chaque autre point est ajouté à la classe "terrain" uniquement si sa position se trouve

à une certaine distance du modèle de terrain et si l'angle entre le modèle de terrain et la ligne reliant ce nouveau point à un point de la classe "terrain" est inférieur à une certaine valeur d'angle, fixée par l'utilisateur. Cette opération a été répétée pour tous les ensembles de données et, finalement, tous les points classés comme "terrain" peuvent être utilisés pour générer des MNT. Pour cette étude de recherche, en plus des MNT, des modèles numériques de surface (MNS) et des orthophotos dans le système de coordonnées WGS84 - UTM 32N ont également été extraits. Les résolutions de ces produits ont été attribuées en fonction des précisions des modèles 3D obtenus, d'environ 3-4 cm.

Les MNT obtenus par le processus photogrammétrique ont servi de données d'entrée pour l'estimation de la hauteur de neige. L'analyse a porté exclusivement sur la zone des pistes de ski, en considérant un écart d'environ 1 m par rapport aux bords. Pour l'estimation de la hauteur de neige, la hauteur du terrain sans neige a été soustraite de la hauteur de la couverture neigeuse dans les autres MNT produits, en utilisant la boîte à outils Raster Math du logiciel ArcMap (ArcGIS). Les résultats de cette opération sont de nouveaux produits matriciels (images numériques), contenant la valeur de l'épaisseur de neige dans chaque cellule.

Pour estimer l'épaisseur de la neige, la différence de hauteur entre le MNT du terrain enneigé et le MNT de la piste enneigée a été calculée (Figure 13).

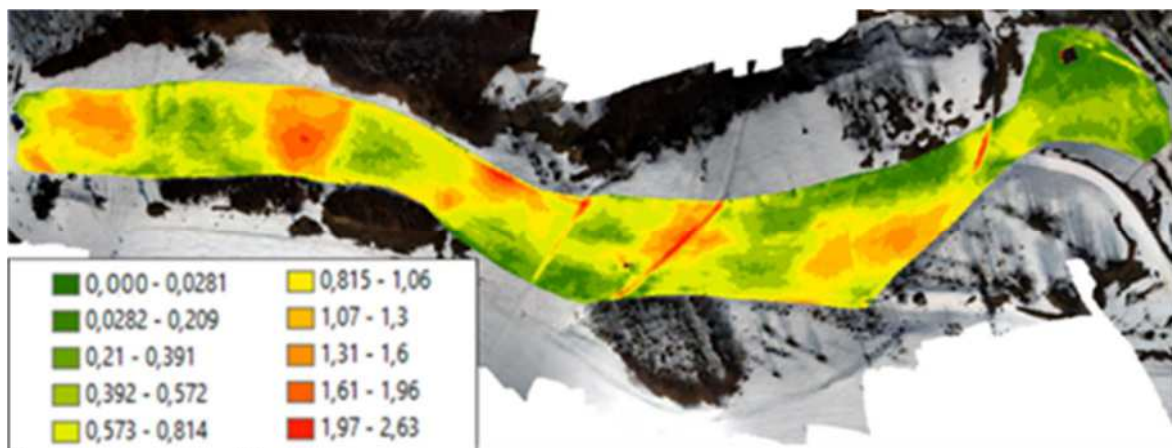


Figure 13. Exemple d'estimation de la hauteur de neige, comme différence entre le MNT du niveau de neige de la piste Armand, réalisé à partir des données collectées lors de la deuxième campagne de relevés, et le MNT représentant la hauteur "zéro" du terrain (valeurs exprimées en mètres).

Le Tableau 8 montre l'épaisseur moyenne, maximale et minimale de la neige estimée pour les deux zones d'étude.

Tableau 8. Valeurs de l'épaisseur de neige.

Set di dati (neve)	Spessore medio [m]	Spessore massimo [m]	Spessore minimo [m]
ALP snow- I test	1.08	2.6	0,48
ALP neve- II test	0,67	2.63	0.22
PPN neve- I test	0.92	2.50	0.04
PPN neve- II test	0.73	2.43	0.07

Les valeurs estimées de l'épaisseur de la neige sont conformes aux prévisions des gestionnaires des stations de ski. Comme on le suppose, il existe des variations le long des pistes de ski, principalement dues à la présence de dépressions et de sentiers piétons sur le terrain d'origine. Les différences entre l'épaisseur calculée après les premiers tests, effectués fin janvier, et l'épaisseur estimée après le second test, effectué début mars, pour chacune des deux stations, montrent comment l'augmentation des températures typique de l'arrière-saison a provoqué une légère diminution du manteau neigeux. L'effet de la fonte des neiges est appréciable au bas des pentes, où la neige est particulièrement fine, en raison également du passage massif de personnes.

2.2 Mesures avec traçage GNSS sur les dameuses

Un autre objectif de cette recherche était de réaliser un test pour contrôler le parcours de la dameuse et permettre aux gestionnaires des pistes de ski de Limone Piemonte de quantifier la consommation de carburant.

À cette fin, nous avons analysé les performances du récepteur Tersus BX-306 (Tableau 9), une carte GNSS RTK bi-fréquence à faible coût pour le positionnement au centimètre près : elle fournit des mesures brutes qui peuvent être intégrées aux pilotes automatiques et aux unités de navigation inertielle. Le récepteur utilisé supporte trois constellations (GPS L1/L2, GLONASS G1/G2 et BeiDou B1/B2) pour assurer la continuité et la fiabilité des mesures RTK.

Tableau 9. Caractéristiques de Tersus BX-306.

Ricevitore GNSS	Tersus PreciS BX-306
Immagine	
Prezzo	\$1,699.00
Consumo di energia	3,5 W
Peso	23g
costellazioni	GPS L1/L2, GLONASS G1/G2, BeiDou B1/B2
Frequenza di aggiornamento della posizione	1Hz-20Hz
Formato dati grezzi	Protocollo binario Tersus (TRS)
Tipo di correzioni	RTCM 2.x/3.x/CMR/CMR+

Ce récepteur est capable d'appliquer les corrections différentielles transmises par le logiciel qui gère le réseau CORS et d'enregistrer les données brutes (phase porteuse, mesures de pseudo-distance et Doppler) sur un ordinateur portable.

Le Tersus BX-306 a été utilisé avec l'antenne de détection AX3702, dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 10.

L'antenne a été montée sur le toit de la dameuse et un ordinateur portable, connecté au récepteur via une interface USB, a été placé à l'intérieur du véhicule pour lancer et enregistrer les données GNSS (Figure 14).

Tab. 10. Caractéristiques de l'antenne GNSS AX3702 de Tersus.

Antenna GNSS	AX3702
Immagine	
Prezzo	\$ 160,00
Guadagno	5,5 dBi
Peso	374 g
costellazioni	GPS L1/L2, GLONASS G1/G2, BeiDou B1/B2

Les corrections ont été obtenues par radio à partir d'une station de base située à un point connu du réseau de référence pour un positionnement précis en temps réel afin de résoudre les ambiguïtés de la phase de la porteuse GNSS.

Le récepteur a été réglé pour fournir une solution avec un taux d'échantillonnage de 1 Hz. En outre, il a été nécessaire d'initialiser l'acquisition des données quelques minutes avant que la dameuse ne commence à se déplacer, car le GNSS Tersus nécessite un temps de 60 secondes pour la première correction, ce qui est facilement réalisable même avec de longues lignes de base.

Connaissant les positions mesurées par le récepteur GNSS, il est possible d'estimer la hauteur de la neige par rapport à la lame de la dameuse, avec laquelle la surface sera ensuite modélisée. À l'aide d'une station totale, le bras de levier entre l'antenne GNSS et le point central de la lame, qui entre en contact avec la neige, a été estimé. Afin de bien évaluer la hauteur de la neige par rapport à la position du véhicule, il faut tenir compte de son attitude pendant le mouvement ; par conséquent, le lacet et l'inclinaison de la dameuse ont été estimés en considérant sa position par rapport à la position estimée précédemment.

L'acquisition des données a été effectuée la nuit précédant l'un des vols du drone et a duré environ trois heures.



Figure 14. La dameuse (à gauche) et l'installation de l'antenne sur le toit du véhicule.

L'évaluation de la qualité du positionnement a été réalisée en considérant la l'écart-type moyen, maximum et minimum, calculé dans les composantes Nord, Est et Haut.

Les solutions obtenues avec le Tersus BX-306 ont montré que les valeurs moyennes de l'écart-type sont inférieures à 1 cm pour les composantes horizontales, et d'environ 1 cm pour la composante verticale.

Afin d'obtenir la plus grande précision dans le positionnement RTK, il est essentiel de fixer les ambiguïtés de la phase de la porteuse à des nombres entiers. Nous avons donc considéré une méthode statistique également connue sous le nom de test de ratio [13]. Des valeurs de rapport élevées (>3) indiquent que la solution choisie est au moins 3 fois meilleure que la solution la plus probable suivante et la solution peut être qualifiée de "fixe" ; sinon, si la valeur du rapport est comprise entre 0 et 3, la solution sera qualifiée de "flottante".

Lors de l'essai de positionnement RTK, le pourcentage de solutions Float était de 22 %, tandis que les ambiguïtés de phase de la porteuse étaient fixées à des nombres entiers pour 78 % des solutions (Figure 15).

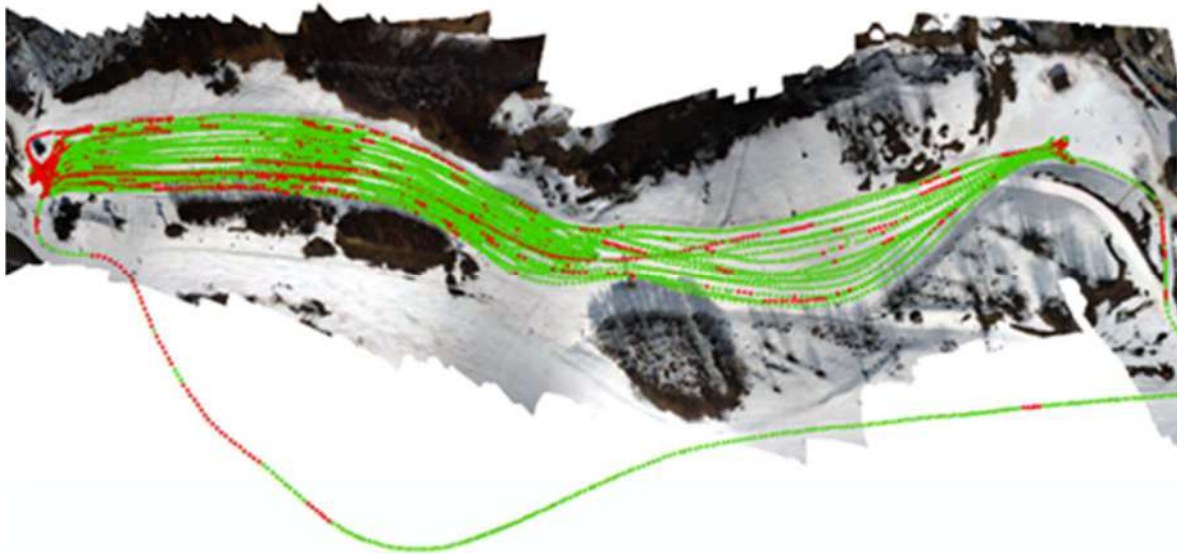


Figure 15. Le positionnement de la dameuse : le rouge indique les solutions flottantes et le vert les solutions fixes..

En connaissant le bras de levier entre l'antenne GNSS et le point central au fond de la lame, et l'attitude du véhicule, estimée à partir de la position mesurée précédemment, il est possible de calculer l'épaisseur de la neige en un point donné à un moment donné. L'épaisseur de la neige peut être estimée comme la différence entre la hauteur du fond de la lame et la hauteur du sol de référence (Figure 16). Il s'agit de la première étape d'un travail de recherche visant à estimer la hauteur de la neige, en temps réel, lors des opérations de modélisation de la neige.

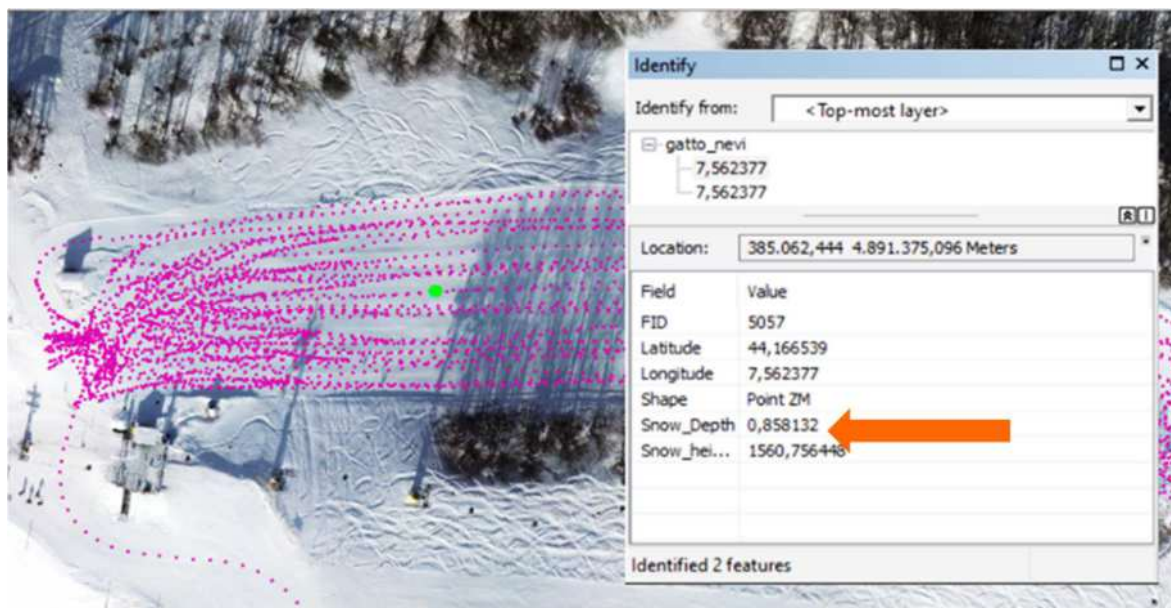


Figure 16. Affichage de l'épaisseur de la neige sur un système d'information géographique (SIG), estimée comme la différence de hauteur entre le point le plus bas de la lame et le terrain de référence.

3 Développement d'un équipement pour la surveillance des canons à neige

Dans le cadre du projet, un équipement a été développé en collaboration avec la société OM3 de Lesegno (CN) pour la mesure et l'enregistrement de la puissance électrique absorbée, utilisable avec des machines ayant une alimentation triphasée à 5 pôles allant jusqu'à 63 ampères, soit une puissance d'environ 25 kW (Figure 17). Cet équipement est donc capable de mesurer et d'enregistrer la puissance électrique absorbée et se compose de trois pinces à courant connectées à une carte Arduino, elle-même connectée à un module de carte SD et à un module d'"horloge interne" pour maintenir la synchronisation du temps.

Cet équipement peut donc être utilisé pour surveiller les anciens canons à neige dépourvus de système de mesure intégré, afin également d'évaluer leur remplacement.



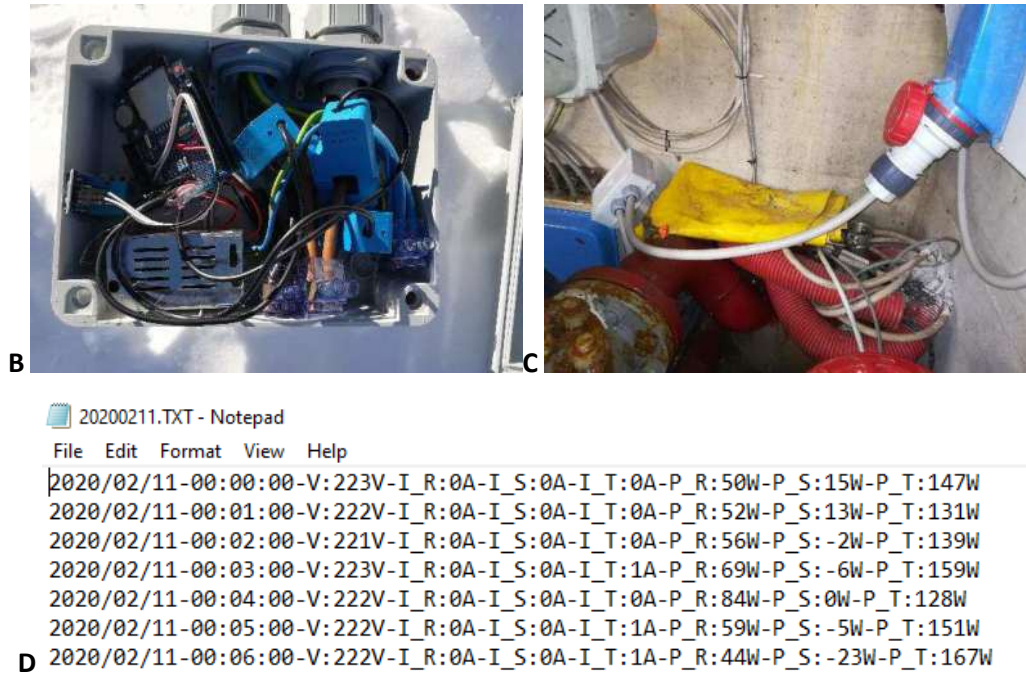


Figure 17. Enregistreur de puissance électrique triphasée pentapolaire : instrument avec fiche et prise (A), détail du boîtier avec les 3 pinces ampérométriques et la carte Arduino avec carte SD (B), connexion à l'alimentation (C) et capture d'écran de la puissance mesurée sur les trois phases (P_R, P_S et P_T) (D).

En ce qui concerne la mesure du débit, la principale difficulté technique dans le cas des canons à neige est liée aux pressions de fonctionnement élevées, supérieures à 30 atm, qui empêchent l'utilisation de compteurs volumétriques courants.

Pour cette raison, on a expérimenté des débitmètres à ultrasons, qui se basent sur la mesure du temps de parcours du son à l'intérieur du tuyau rempli d'eau : de la différence entre les temps mesurés dans le sens du courant (t_1 dans la Figure 18) et à contre-courant (t_2 dans la Figure 18), on obtient la vitesse de l'écoulement de l'eau dans le tuyau et, donc, le débit.

Les débitmètres ont été installés dans les puits de la piste Armand à Limone (Figure 19) en plaçant les capteurs sur un morceau de tuyau avec des connexions Camlock, comme celles utilisées par les canons à neige.

Cependant, l'expérimentation mise en œuvre au cours de l'hiver 2019/2020 n'a pas donné de résultats satisfaisants en raison de problèmes d'enregistrement des données mesurées et du faible diamètre des tuyaux (50 mm), proche de la limite d'utilisabilité des capteurs à ultrasons. Il a également été très difficile de sécuriser le contact des capteurs à ultrasons avec le tuyau, compte tenu des déplacements et des chocs qu'il subit lors de son utilisation et sur la liaison avec les canons à neige.

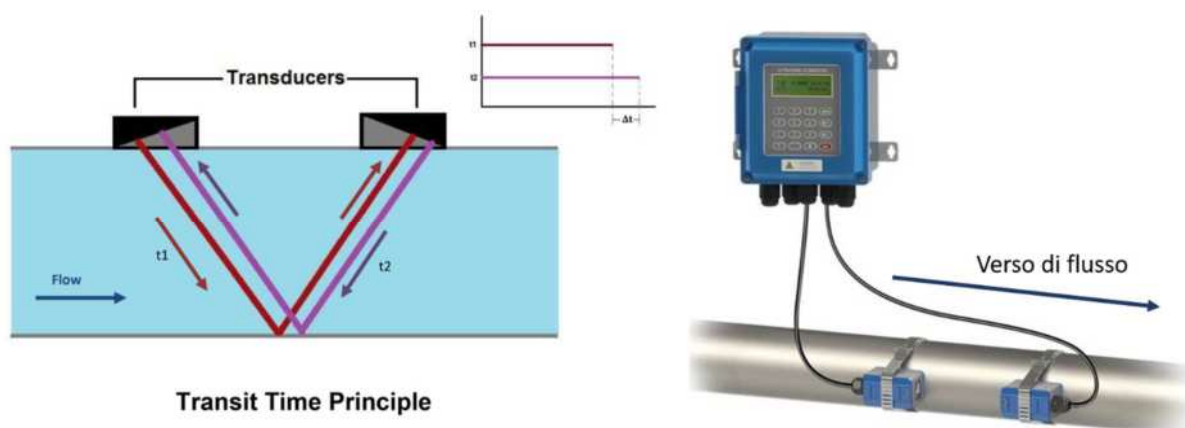


Figure 18. Installation d'un débitmètre à ultrasons dans le puits d'alimentation des canons à neige.



Figure 19. Installation d'un débitmètre à ultrasons dans le puits d'alimentation des canons à neige.

4 Initiatives de communication

4.1 Événement final SMART ALTITUDE (10-11 mai 2021)

Les 10 et 11 mai 2021 s'est tenue la conférence finale du projet SMART ALTITUDE (<https://www.alpine-space.org/projects/smart-altitude/en/home>), à deux événements de laquelle les professeurs Casasso et Lingua ont participé en ligne le premier jour (Figure 20).



Program overview

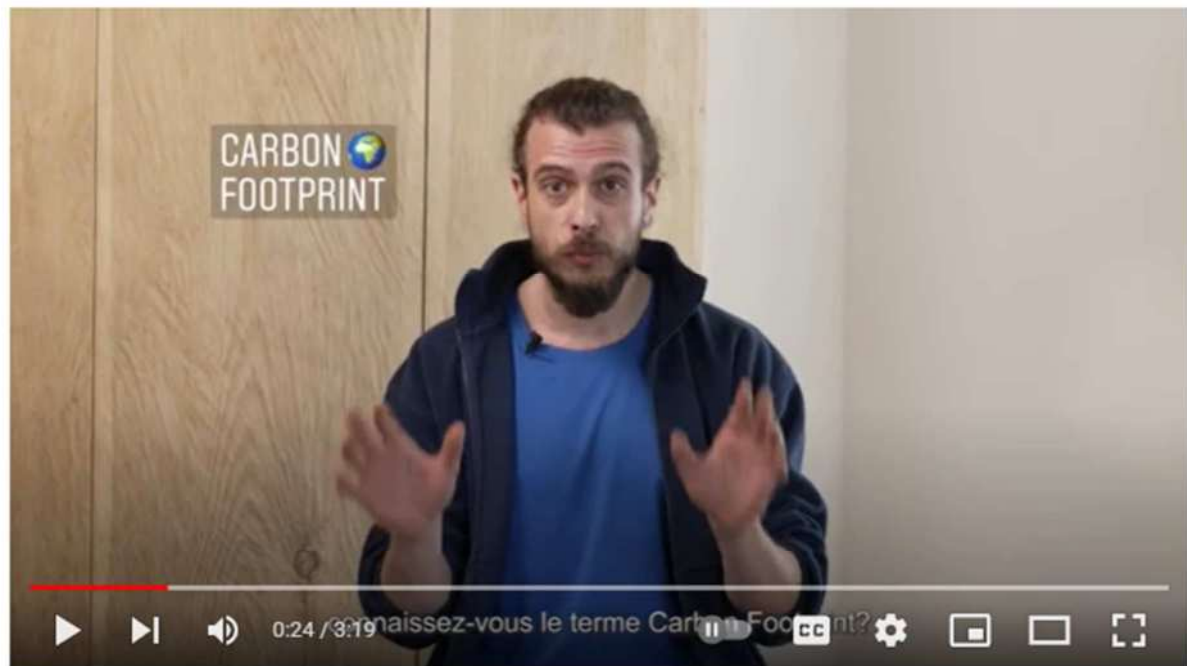
10 May 2021 – Ecological and tourism transition for the mountains of tomorrow: achievements and perspectives

9:00-11:20	Session 1 – The Smart Altitude project: achievements and perspectives	
9:00-9:30	Welcome words by the authorities	Secretary of State of Rural affairs (J. Giraud), Region Provence-Alpes-Côte d'Azur (C. Eymeoud), Department 05 (JM. Bernaldi), Les Orres (P. Vollaire)
9:30-9:40	Quick overview of the Smart Altitude project	Smart Altitude / Les Orres (Y. Bidault)
9:40-10:00	Review of Smart Altitude's Living Labs' achievements	Krvavec (J. Vidovic), Trentino Sviluppo/FBK (G. Baldessari, D. Viesi) Verbier (X. Tabin), Les Orres (Q. Daragon/P. Vollaire)
10:00-10:15	Smart Altitude's replication process: first results & perspectives	Smart Altitude: University of Milan (S. Sala), Steinbeis 2i (D. Ramette), AlpGov 2 (P. Chazaud)
10:15-10:45	Achievements of other INTERREG projects on energy transition in the Alpine Space	Feedback on the Métakief EUSALP event (O. Elvrand), insights from Alpine Space and Alcotra projects: PITER Temes Monviso EoO (H. Klinger), PITER AlpiMed (A. Casasso)
10:45-11:00	QUESTIONS & ANSWERS	
11:00-11:15	Break	
11:15-12:30	Session 2 – Expectations from professionals & territories	
11:15-12:10	Round table 1 – Socio-economic aspects and expression of the expectations of socio-professionals, the tourist industry and communities for the mountain of tomorrow	CCI Hautes-Alpes (E. Gordie), Agence de développement 05 (Y. Chaix), DSF (A. Maulin), ESF (E. Brèche), SUERA (C. Barret), EGT (F. Meignan), ANMSM (J.L. Boch, P. Vollaire), Les 2 Alpes (C. Aubert), Bourg ST Maurice (G. Desrues), Cluster montagne (P. Grand'Eury)
12:10-12:30	QUESTIONS & ANSWERS	
12:30-13:45	Lunch Break	
13:45-16:40	Session 3 – Perspectives and action plans for the mountains of tomorrow	
13:45-13:55	Session opening: summary of previous work – Movie Smart Flexgrid Smart mountain/movie Smart Altitude	P. Vollaire (Les Orres)
13:55-15:10	Round table 2 – Climate change and technological developments for the energy & tourism transitions: views of major industrial and R&I players on the future of mountain activity	EDF (F. Busin), Orange (J. Bassaler), SFR (I. Simon), Veolia (E. Lahaye), RTE (JP. Bonnet), CEA-Tech / INES (A. Jouin), Politecnico di Torino (L. Aicardi, A. Lingua), INRAE (E. George), AMU (J.L. Lazzari)
15:10-16:40	Round table 3 – Regional, National and European plans and strategies for the ecological and tourism transitions	French Secretary of Biodiversity (B. Akiba), Alpine Committee (C. Eyméoud), Alpine regions: Provence-Alpes-Côte d'Azur (R. Muselier), Auvergne-Rhône-Alpes (F. Pannekoucke), Bourgogne-Franche-Comté (L. Lucchesi), Trentino-Alto-Adige (M. Casotto), Lombardy (L. La Rocca), Deputy of Isère (MN. Battistelli), Banque des Territoires (C. Cariou)
2 &	2	
17:00-17:45	PRESS CONFERENCE	

Figure 20. Programme de la première journée de la conférence finale du projet SMART ALTITUDE.

Le Prof. Casasso a fait une présentation sur la consommation d'énergie dans les stations de ski, dont les diapositives sont présentées à la Figure 21. Le Prof. Lingua a participé à la table ronde sur la recherche et le développement dans le domaine des activités touristiques de montagne à la lumière du changement climatique en cours.





Carbon Footprint di una stazione sciistica



Alpimed
29 subscribers

Subscribe

1



Share



Figure 22. Images de la vidéo YouTube sur l'empreinte carbone des stations de ski.

Le guide (Figure 23), composé de 28 pages, disponible sur le site <https://bit.ly/guidaCFPstazionisci>, développe les concepts décrits dans la vidéo et présente les initiatives réalisées par le projet dans les stations de ski de Limone Piemonte et Prato Nevoso.



Figure 23. Copertina e una pagina della brochure sull'impronta carbonica delle piste di sci.

4.3 Événement CCIAA Cuneo (28 avril 2022)

Le 28 avril 2022, une conférence s'est tenue au siège de la CCIAA de Cuneo pour présenter les résultats du WP 4.1.2 du projet PITER Alpimed INNOV. Les professeurs Casasso et Lingua ont participé pour le Politecnico di Torino - DIATI, avec une présentation (Figure 24) sur la consommation d'énergie et l'empreinte carbone des pistes de ski et les méthodologies développées dans le projet pour caractériser l'épaisseur du manteau neigeux et ainsi réduire la consommation liée au damage des pistes.

Un reportage sur l'événement a été diffusé par le journal télévisé régional de la RAI le 29/04/2022, disponible sur https://bit.ly/20220429_TGRPiemonte (minutes 4:50 - 7:08 environ).



Figure 24. Première page et une diapositive de la présentation des Professeurs Casasso et Lingua lors de l'événement du 28 avril 2022.

4.4 Événement Straconi Week (Cuneo, 18 novembre 2022)

Le vendredi 18 novembre 2022, au Spazio CRC de Via Roma 17, à Cuneo, un événement a été organisé sur le rapport entre les stations de ski et le changement climatique (Figure 25), dans le cadre de la "Straconi Week" (une semaine de rencontres liées à l'événement populaire de Cuneo). Dans le cadre de cet événement, le professeur Casasso a expliqué les concepts de l'impact des stations de ski sur le climat aux élèves du lycée "Sebastiano Grandis" de Cuneo.



Figure 25. Affiche et photos de l'événement de la Straconi Week du 18 novembre 2022.

4.5 Événement final PITER Alpimed (Nice, 6 décembre 2022)

Dans le cadre de l'événement final du projet PITER Alpimed, qui s'est tenu à Nice le 6 décembre 2022, le professeur Casasso a présenté les résultats de l'étude sur l'empreinte carbone des stations de ski lors d'une session sur l'adaptation au changement climatique (Figure 26).

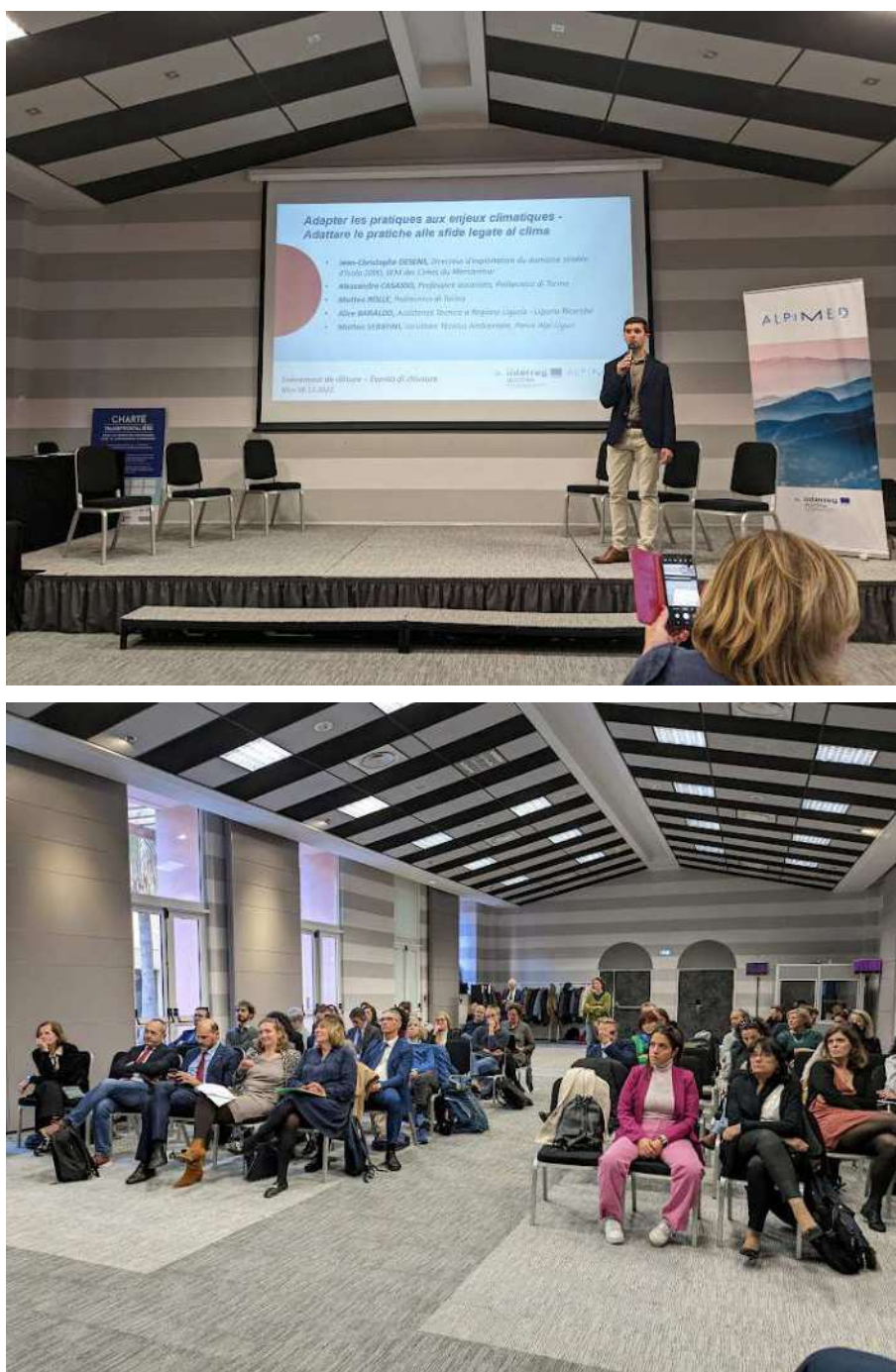


Figure 26. Session sur le changement climatique dans le cadre de l'événement final du PITER Alpimed.

Bibliographie

1. De Santis, J. Carbon footprint delle stazioni sciistiche: metodi di quantificazione e ipotesi di contenimento Available online: <https://webthesis.biblio.polito.it/15645/>.
2. Skiresort service Skiresort - The World's Largest Test Portal for Ski Resorts Available online: <https://www.skiresort.info/> (accessed on 4 January 2022).
3. Noussan, M. Quanta Energia Si Consuma per Una Giornata Sugli Sci? Available online: <http://www.raccontadati.it/2019/01/energia-sci/>.
4. Smart Altitude project consortium Smart Altitude Toolkit Available online: <https://smartaltitude.eu/>.
5. Smart Altitude project consortium Smart Altitude. Alpine Winter Tourism Territories Demonstrating an Integrated Framework for a Low-Carbon, High-Impact and Resilient Future. Available online: <https://www.alpine-space.org/projects/smart-altitude/en/home>.
6. Rixen, C.; Teich, M.; Lardelli, C.; Gallati, D.; Pohl, M.; Pütz, M.; Bebi, P. Winter Tourism and Climate Change in the Alps: An Assessment of Resource Consumption, Snow Reliability, and Future Snowmaking Potential. *Mountain Research and Development* **2011**, *31*, 229–236, doi:10.1659/MRD-JOURNAL-D-10-00112.1.
7. Berard-Chenu, L.; Cognard, J.; François, H.; Morin, S.; George, E. Do Changes in Snow Conditions Have an Impact on Snowmaking Investments in French Alps Ski Resorts? *International Journal of Biometeorology* **2020**, doi:10.1007/s00484-020-01933-w.
8. Hartl, L.; Fischer, A.; Olefs, M. Analysis of Past Changes in Wet Bulb Temperature in Relation to Snow Making Conditions Based on Long Term Observations Austria and Germany. *Global and Planetary Change* **2018**, *167*, 123–136, doi:10.1016/j.gloplacha.2018.05.011.
9. Avanzi, F.; Bianchi, A.; Cina, A.; De Michele, C.; Maschio, P.; Pagliari, D.; Passoni, D.; Pinto, L.; Piras, M.; Rossi, L. Centimetric Accuracy in Snow Depth Using Unmanned Aerial System Photogrammetry and a MultiStation. *Remote Sensing* **2018**, *10*, 765, doi:10.3390/rs10050765.
10. Marino, B.G.; Masiero, A.; Chiabrando, F.; Lingua, A.M.; Fissore, F.; Błaszczak-Bak, W.; Vettore, A. Data Optimization for 3D Modeling and Analysis of a Fortress Architecture. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* **2019**, *XLII-2/W11*, 809–813, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-809-2019.
11. Goetz, J.; Brenning, A. Quantifying Uncertainties in Snow Depth Mapping From Structure From Motion Photogrammetry in an Alpine Area. *Water Resour. Res.* **2019**, *55*, 7772–7783, doi:10.1029/2019WR025251.
12. Turner, D.; Lucieer, A.; Watson, C. An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Remote Sensing* **2012**, *4*, 1392–1410, doi:10.3390/rs4051392.
13. Cina, A.; Dabove, P.; Manzino, A.M.; Piras, M. Augmented Positioning with CORSs Network Services Using GNSS Mass-Market Receivers. In Proceedings of the 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS 2014; IEEE: Monterey, CA, USA, May 2014; pp. 359–366.