

## **CAPITOLO 3**

### **MODELLI NUMERICI PER LA SIMULAZIONE DELLA STRUTTURA DEL MANTO NEVOSO**

### 3.1 - INTRODUZIONE

Il grande incremento di praticanti di sport invernali e quindi frequentatori delle montagne di questi ultimi anni ha implicato un maggior bisogno di sicurezza. Le valanghe provocano morti ogni anno, in particolar modo fra gli sciatori e gli sci-alpinisti. Causano inoltre tantissimi danni alle strade e alle infrastrutture montane.

Sono state create misure preventive con lo scopo di minimizzare i danni delle valanghe. Seguendo l'esempio del "Weissfluhjoch Institute" in Svizzera, i francesi nel 1959 hanno creato a Grenoble il Centro Studi sulla neve (Centre d'études de la neige (CEN)), sotto la supervisione dell'Ufficio di Meteorologia Francese. Il CEN è stato incaricato di elaborare un sistema di previsione del pericolo di valanghe e di condurre ricerche e sviluppi in quel campo. Fino al 1984 il CEN aveva prodotto relazioni sulle valanghe, mentre dal 1984 in poi le relazioni giornaliere sono state realizzate dai centri meteorologici situati nelle Alpi Francesi e sui Monti Pirenei attraverso un nuovo sistema con lo scopo di fornire informazioni più dettagliate.

I diversi centri utilizzano modelli differenti tutti sviluppati dal CEN, che ora dedica la maggior parte della propria attività nella ricerca e nello sviluppo di metodi e strumenti per la previsione del pericolo di valanghe.

I progressi nelle ricerche sulla neve e le maggiori potenze di calcolo delle ultime generazioni di computer hanno reso possibile simulare le principali caratteristiche del manto nevoso e la corrispondente attività valanghiva.

Il CEN ha sviluppato un sistema automatico basato su tre modelli matematici indipendenti denominati, rispettivamente, SAFRAN, CROCUS e MÉPRA. L'insieme di questi tre modelli è stato in seguito chiamato "catena" SCM. Gli unici dati in ingresso a questa "catena" sono le osservazioni meteorologiche

giornaliere, ottenute da modelli meteorologici numerici e stazioni meteorologiche. Nessuna informazione relativa al manto nevoso viene fornita al sistema. Il principale presupposto di questo sistema è l'omogeneità spaziale dei massicci montuosi oggetto dello studio (specialmente per ciò che concerne le precipitazioni): ciò implica l'esclusione della rappresentazione di tutti gli effetti locali, come quelli dovuti, per esempio, all'accumulo ed erosione del vento. Come dati in uscita, la "catena" simula una media del manto nevoso, descritto attraverso la sua stratigrafia, riferita a differenti quote ed aspetti relativi in particolare a 23 massicci montuosi nelle Alpi Francesi e a 15 massicci montuosi nei Pirenei (tra Francia e Spagna). Viene simulato inoltre il corrispondente rischio di valanghe. Questo insieme di modelli è stato utilizzato operativamente sin dall'inverno 1992/'93 da coloro che si occupano della previsione del pericolo di valanghe delle Alpi Francesi e dall'inverno 1995/'96 nei Pirenei. Allo stesso tempo è stato sviluppato e migliorato attraverso l'utilizzo pratico e paragonando i risultati con diverse osservazioni effettuate da operatori.

L'insieme dei modelli SCM è stato anche utilizzato nelle ricerche in campo idrologico (Braun e altri nel 1994), negli studi sulla sensibilità del manto nevoso ai cambiamenti climatici (Martin e altri nel 1994). Anche questi studi hanno contribuito molto allo sviluppo dei modelli.

### **3.2 – METODI UTILIZZATI ATTUALMENTE PER LA PREVISIONE DEL PERICOLO DI VALANGHE**

E' dal 1970 che diversi modelli di previsione delle valanghe vengono utilizzati e

sviluppati da numerosi centri di ricerca su neve e valanghe. I metodi statistici che utilizzano analisi discriminanti sono stati i principali modi di affrontare il problema ( Bois ed altri nel 1975, Buser ed altri nel 1987) sebbene generalmente questi sistemi non abbiano a che fare direttamente con i processi fisici della neve. Sistemi operativi basati su metodi più aggiornati vengono utilizzati in numerosi Paesi, ma i loro risultati dipendono molto dai dati archiviati disponibili. La più diffusa comune limitazione di questi sistemi è che i criteri con i quali si ricercano situazioni simili fra loro, utilizzano generalmente dati meteorologici piuttosto che stati interni del manto nevoso (stratigrafia e parametri fisici dei differenti strati di neve). La capacità caratteristica delle funzioni utilizzate deve essere studiata attentamente al fine di ottenere i migliori risultati pratici in modo costante per tutto il periodo di utilizzazione.

In termini generali, gli approcci statistici sono strumenti efficienti, ma la loro semplicità implica tarature precise e lunghe serie di calibrature. Questi metodi si adattano meglio alla previsione di valanghe dovute a neve fresca piuttosto che a quelle a lastroni provocate dagli sciatori. Come sottolineato da Bader e Salm (1990) e da Schweizer (1993), i metodi statistici non possono individuare la presenza di strati poco resistenti che sono la causa principale delle valanghe a lastroni. Infine, se le informazioni riguardanti la struttura verticale del manto nevoso sono disponibili in un dato momento (tipicamente una volta alla settimana attraverso un carotaggio nella neve), modelli di quel tipo non sono in grado di fornire continuamente ed in tempo reale l'evoluzione delle caratteristiche dei diversi strati di neve. Questi modelli utilizzano misurazioni locali come fonte principale di dati in ingresso ed in questo modo hanno difficoltà nel tenere in

considerazione la variabilità della stabilità del manto nevoso in funzione dell'altitudine e della pendenza. Sono stati inoltre sviluppati modelli numerici per simulare i processi del manto nevoso (Colbeck, 1973; Navarre, 1975; Obled e Rossé, 1975; Anderson, 1976). Questi modelli, basati su principi fisici, simulano l'evoluzione del manto nevoso in funzione delle condizioni meteorologiche. Includono una rappresentazione dei principali fenomeni riguardanti i bilanci di energia e di massa del manto nevoso. Una nuova generazione di questi modelli a una dimensione ha aggiunto ulteriori processi fisici alla simulazione del manto nevoso e all'interfaccia neve-atmosfera. Essi includono il metamorfismo della neve e l'assorbimento delle radiazioni solari. Questi processi possono essere simulati in diversi modi. Il modello SNOWTHERM (Jordan, 1991) calcola la velocità di evoluzione dei cristalli di neve utilizzando principi termodinamici, mentre il modello CROCUS (Brun ed altri nel 1989 e 1992) calcola l'evoluzione sia di dimensione che di forma del cristallo di neve basandosi sulla classificazione internazionale dei cristalli di neve (Colbeck ed altri nel 1990).

Un primo tentativo di utilizzare questi modelli per la previsione di valanghe è stato fatto in Francia nel 1988, basandosi sulla versione preliminare del modello CROCUS. Questo modello richiedeva come dati in ingresso manuali le osservazioni o le previsioni delle variabili meteorologiche, necessarie a coloro che prevedevano al fine di calcolare l'evoluzione del manto nevoso in determinati luoghi. Questi dati richiesti limitavano il numero delle possibili simulazioni a circa 5 località al massimo, un numero troppo limitato per calcolare l'evoluzione del manto nevoso a diverse quote e con differenti inclinazioni dei pendii. Per

questo motivo fu deciso di sviluppare la serie di modelli numerici, quali appunto SAFRAN, CROCUS e MÉPRA, mentre in Svizzera è stato elaborato un altro modello, denominato SNOWPACK.

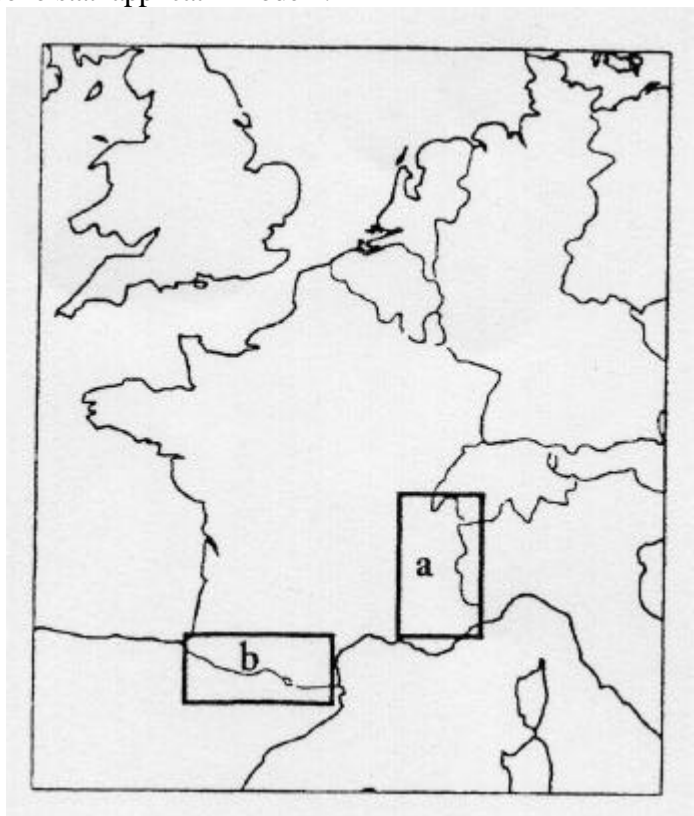
### **3.3 – BREVI CENNI AI MODELLI SAFRAN E MÉPRA**

La stabilità locale del manto nevoso è fortemente influenzata dalla microtopografia, specialmente a causa della grande variabilità spaziale del manto nevoso dovuta agli accumuli provocati dal vento. In particolare nel caso di presenza di strati a debole coesione o nel verificarsi di fenomeni di scioglimento e ricingelamento. Tuttavia, la previsione di valanghe è possibile su larga scala poiché i manti nevosi di determinate zone presentano caratteristiche quasi identiche a quote e inclinazioni dei pendii simili.

Finchè il metamorfismo della neve è provocato dalle condizioni meteorologiche locali, è possibile per determinate quote e caratteristiche dei pendii simulare l'evoluzione delle principali caratteristiche del manto nevoso in una data località utilizzando la media delle condizioni meteorologiche prevalenti in quella zona. Per realizzare ciò, è necessario per prima cosa determinare le condizioni meteorologiche in funzione delle differenti quote ed inclinazioni dei pendii. E dal momento che non è sempre facile reperire i dati relativi ad ogni quota ed inclinazione che servirebbe, il CEN ha realizzato un modello di analisi meteorologiche denominato SAFRAN (Sistema di analisi che fornisce informazioni sulla neve) al fine di elaborare le numerose variabili meteorologiche a partire dalle informazioni dei fenomeni meteorologici disponibili nella regione oggetto di studio e nelle immediate vicinanze. I risultati ottenuti con il modello

SAFRAN vengono, in seguito, elaborati dal modello CROCUS per determinare la relativa evoluzione del manto nevoso. In una terza fase, viene utilizzato il sistema avanzato MÉPRA per accertare la stabilità del manto nevoso per ciascuna quota e ciascun diverso aspetto dello stato interno della neve determinato con il modello CROCUS. A causa della densità di diffusione della rete di stazioni di rilevamento nelle Alpi Francesi e nei Pirenei, ma anche per ragioni pratiche, i ricercatori del CEN hanno preso in considerazione per le loro applicazioni dei modelli una regione vasta circa 500 Km<sup>2</sup> con quote comprese fra i 600m s.l.m. e i 3600m s.l.m. a passi di 300m fra una quota e l'altra. Sono stati studiati versanti montuosi esposti a nord, est, sud-est, sud, sud-ovest e ovest con pendenze comprese fra i 20° ed i 40°.

Nelle Figure 3.3.1, 3.3.1a e 3.3.1b sono rappresentate le regioni con i nomi delle località dove sono stati applicati i modelli.



**Figura 3.3.1:** Alpi Francesi (**a**) e Monti Pirenei (**b**) luogo di applicazione dei modelli (Fonte: *Journal of Glaciology*, Vol. 45, No. 151, 1999)

---

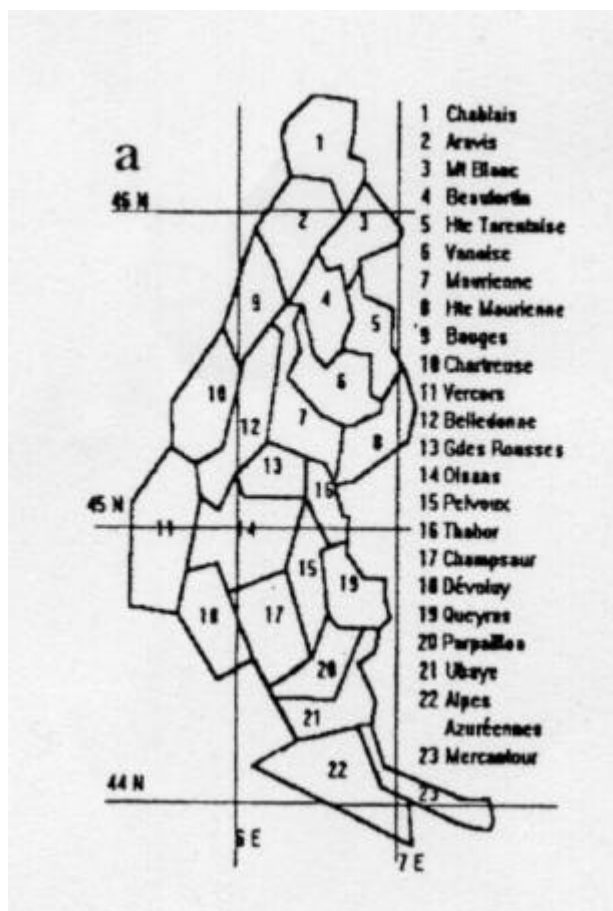


Figura 3.3.1a: le 23 località nelle Alpi Francesi (Fonte: *Journal of Glaciology*, Vol. 45, No. 151, 1999)

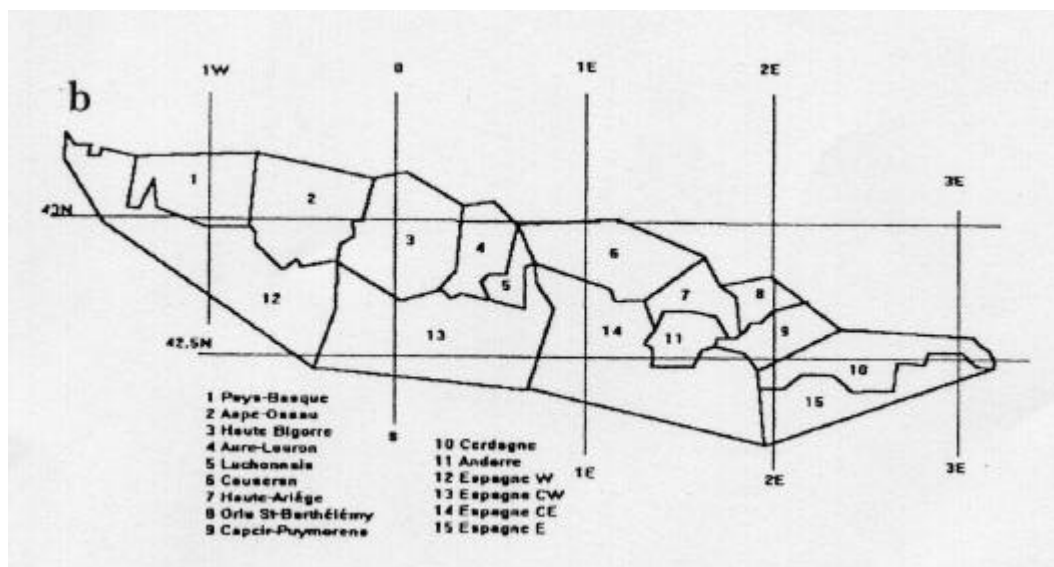


Figura 3.3.1b: le 15 località nei Pirenei (Fonte: *Journal of Glaciology*, Vol. 45, No. 151, 1999)

Nella figura 3.3.2 è illustrata l'architettura di interazione fra i 3 modelli.



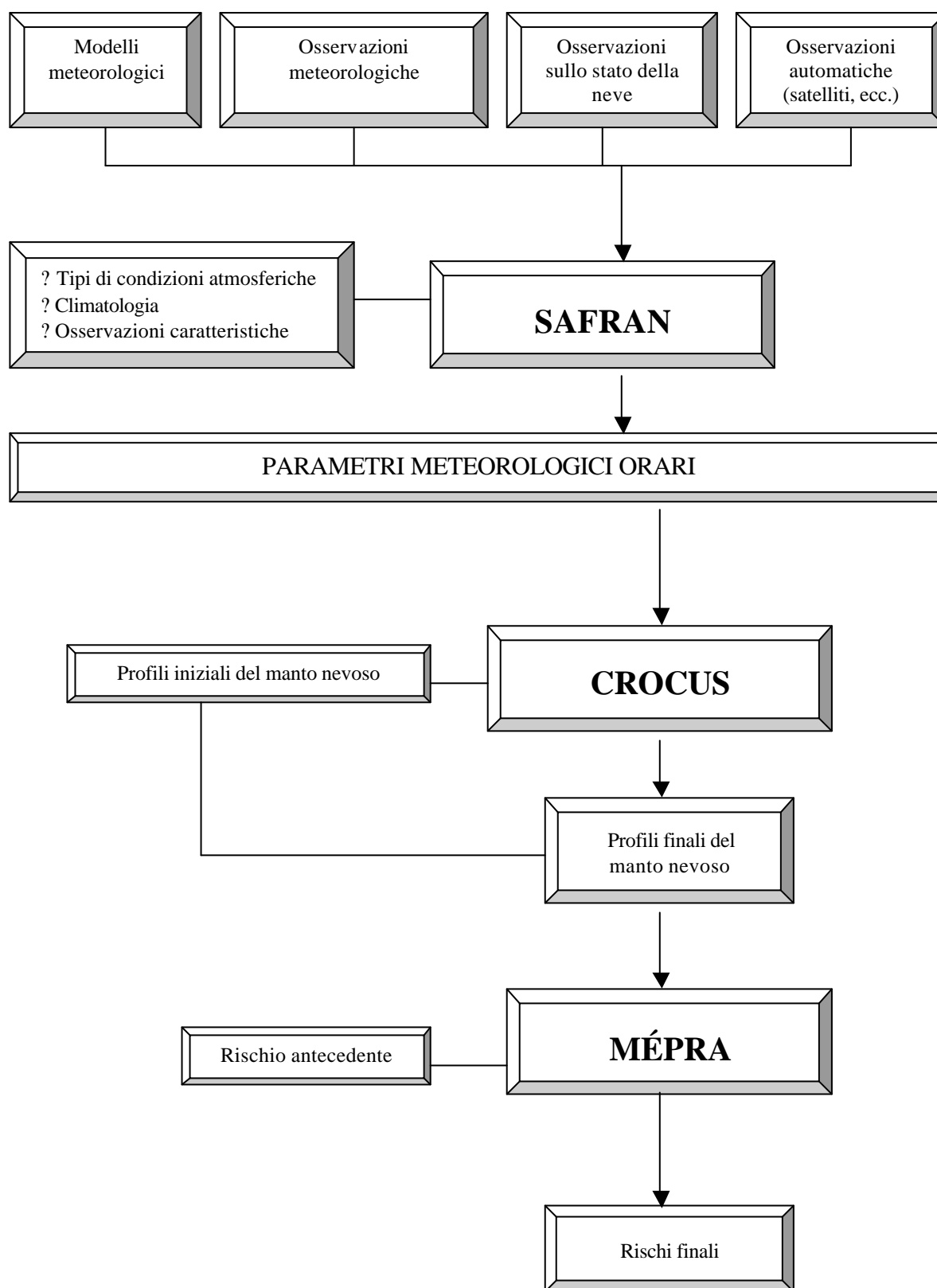


Figura 3.3.2: schema di flusso dati della “catena” SCM (Adattato dalla rivista *Journal of Glaciology*, Vol. 45, No. 151, 1999)

### 3.4 – IL MODELLO NUMERICO “CROCUS”

Il CROCUS è un modello numerico che calcola l'evoluzione dell'energia ed il metamorfismo della massa del manto nevoso. Utilizza come dati in ingresso quelli meteorologici ottenuti attraverso il modello SAFRAN e simula l'evoluzione di temperatura, densità, contenuto in acqua liquida e la stratificazione del manto nevoso. La peculiarità di questo modello risiede nella sua capacità di simulare il metamorfismo della neve sia negli strati superficiali che in quelli profondi e di rappresentare ciascun tipo di neve in una forma più comprensibile. L'albedo della neve ed il coefficiente di estinzione atmosferica dipendono dalla lunghezza d'onda e dal tipo di neve superficiale, dalla dimensione dei suoi grani e dall'età.

Il manto nevoso simulato attraverso il modello CROCUS si trasforma giorno dopo giorno a partire dalla prima nevicata stagionale fino a raggiungere il completo scioglimento senza che il modello venga re-inizializzato. La situazione della neve calcolata per un determinato giorno è, in questo modo basata unicamente sullo stato della neve del giorno precedente e sull'analisi atmosferica del modello SAFRAN del giorno attuale. Non viene utilizzata alcuna informazione riguardante la struttura del manto nevoso. Lo svantaggio di questo sistema di procedere è che si ha un effetto di accumulazione di tutti i possibili errori giornalieri avuti durante la stagione, senza che sia possibile alcuna correzione manuale diretta. Darò una spiegazione più dettagliata di questo inconveniente nel prossimo paragrafo, in riferimento alla validazione dei risultati ottenuti sulla simulazione dell'altezza del manto nevoso nella stazione sciistica di Tignes, nel massiccio della Vanoise in Francia.

L'ultimo più importante sviluppo del modello CROCUS è la determinazione

---

iniziale dei parametri che caratterizzano il cristallo di neve fresca (in particolar modo per ciò che concerne la denticità e la sfericità), che nel modello SAFRAN dipendono dalla velocità del vento, con lo scopo di cominciare a tener conto degli effetti distruttivi del vento durante una bufera di neve.

Le validazioni locali del modello CROCUS sono state condotte principalmente durante l'inverno 1988/'89 nella zona di effettuazione delle ricerche situata al "Col de Porte", dove sono stati misurati e registrati tutti i parametri meteorologici. Con l'ausilio di questi dati, il modello CROCUS ha simulato l'evoluzione degli stati interni del manto nevoso (quali temperatura, contenuto in acqua liquida, profili di densità e stratigrafia), che è stata confrontata con le osservazioni raccolte settimanalmente da uno scavo nella neve effettuato in quel sito (Brun et al. 1992). Nel corso di queste prove, il modello CROCUS ha simulato le condizioni del manto nevoso in modo molto simile alle osservazioni effettuate. Fra l'altro, durante il periodo di test si sono verificati la maggior parte degli eventi atmosferici che si possono osservare nelle regioni Alpine: forti bufere di neve asciutta, lunghi periodi privi di precipitazioni, nevicata in primavera avanzata, elevati gradienti di temperatura. Tutto ciò ha permesso di affinare il modello CROCUS nella simulazione dei principali processi che riguardano il manto nevoso.

### **3.4.1 – VALIDAZIONE DEL MODELLO**

Ciascuno dei tre modelli è stato validato separatamente al fine di stabilire la potenzialità individuale di ognuno, ma è risultata necessaria anche una validazione

---

globale. Infatti, la validazione dei tre componenti della “catena” SCM non assicura che il modello CROCUS possa simulare realisticamente i manti nevosi di un intero massiccio montuoso quando i suoi dati in entrata sono ottenuti giornalmente attraverso il modello SAFRAN al posto di osservazioni locali. Per questo motivo sono stati effettuati numerosi tests al fine di convalidare i risultati del sistema integrato. Descriverò ora i due tipi principali di validazioni che sono state effettuate.

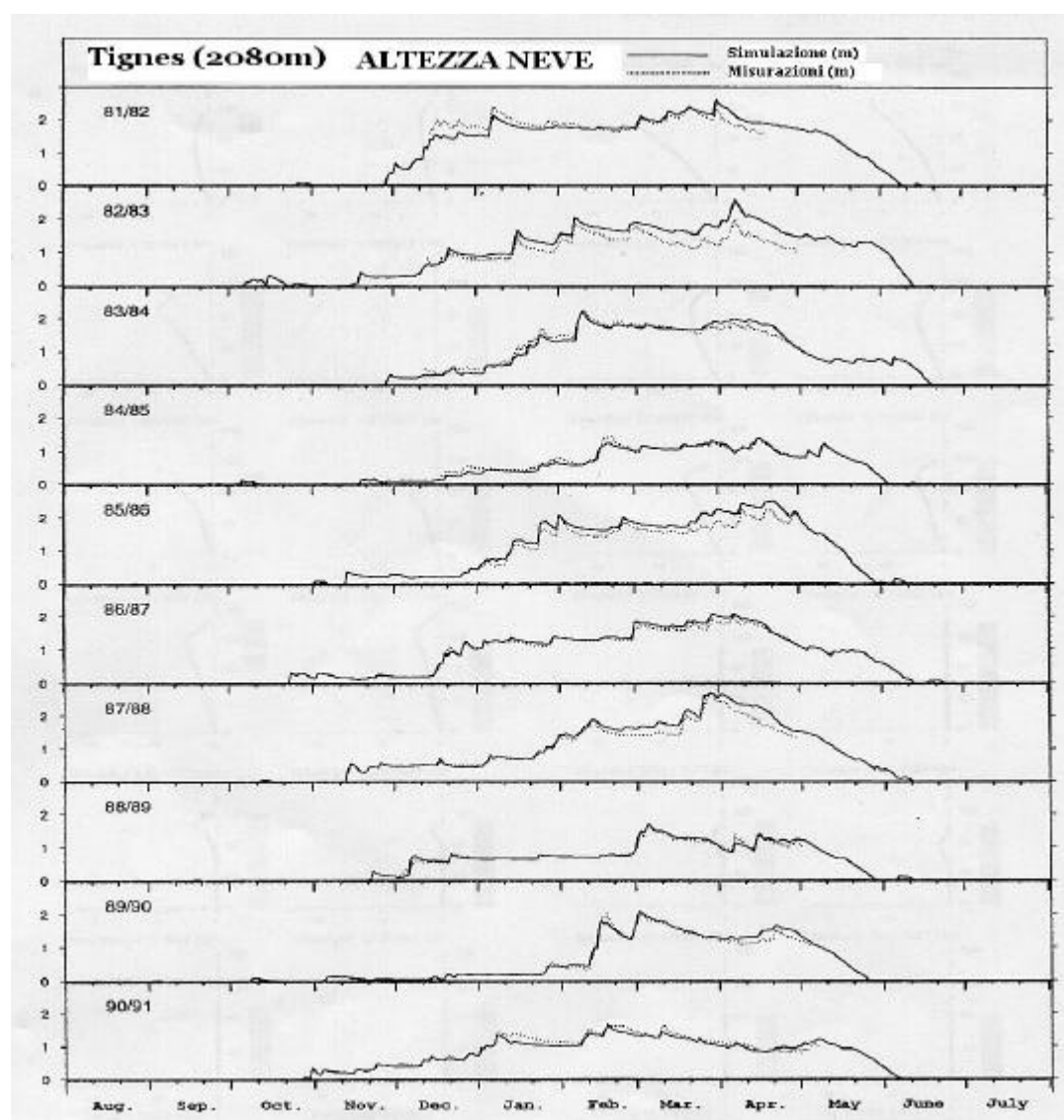
### ✂ ✂ **Validazione delle simulazioni di accumulo e ablazione**

Questi tests servono per verificare la capacità del sistema SAFRAN/CROCUS nel simulare la dinamica del manto nevoso e gli accumuli e ablazioni della neve a varie quote di altitudine. Sono stati simulati 10 anni di altezze di neve giornaliere in 37 luoghi di osservazione diversi, che sono stati paragonati poi alle osservazioni dirette. In molte località considerate, le simulazioni e le osservazioni sono molto simili fra loro e mettono in evidenza la capacità del sistema SAFRAN/CROCUS nel rappresentare gli accumuli di neve fresca, la sua compattazione e lo scioglimento del manto nevoso per diversi valori di quote di altitudine.

Nella Figura 3.4.1.1 è riportato l'esempio della simulazione dell'altezza della neve effettuata nella stazione sciistica di Tignes, confrontata con le corrispondenti misurazioni dirette. Si può notare la stretta correlazione esistente fra le due curve, nonostante le numerose difficoltà insite nella simulazione numerica.

Bisogna evidenziare che la maggior parte delle osservazioni dirette è stata ottenuta durante l'inverno, quando al suolo si era già depositato un significativo

quantitativo di neve. (La curva delle osservazioni non ricopre l'intero arco dell'anno, dal momento che le osservazioni meteorologiche in questa località non erano disponibili in alcuni periodi). Le osservazioni, concentrate soprattutto nel periodo della stagione sciistica, sono la causa principale dell'incertezza della modellazione soprattutto all'inizio del mese di Dicembre 1981. La mancanza di alcuni dati rende, inoltre difficile la valutazione del grado di scioglimento; per esempio, soprattutto nell'Aprile del 1988 la simulazione del grado di scioglimento sembra sbagliata.



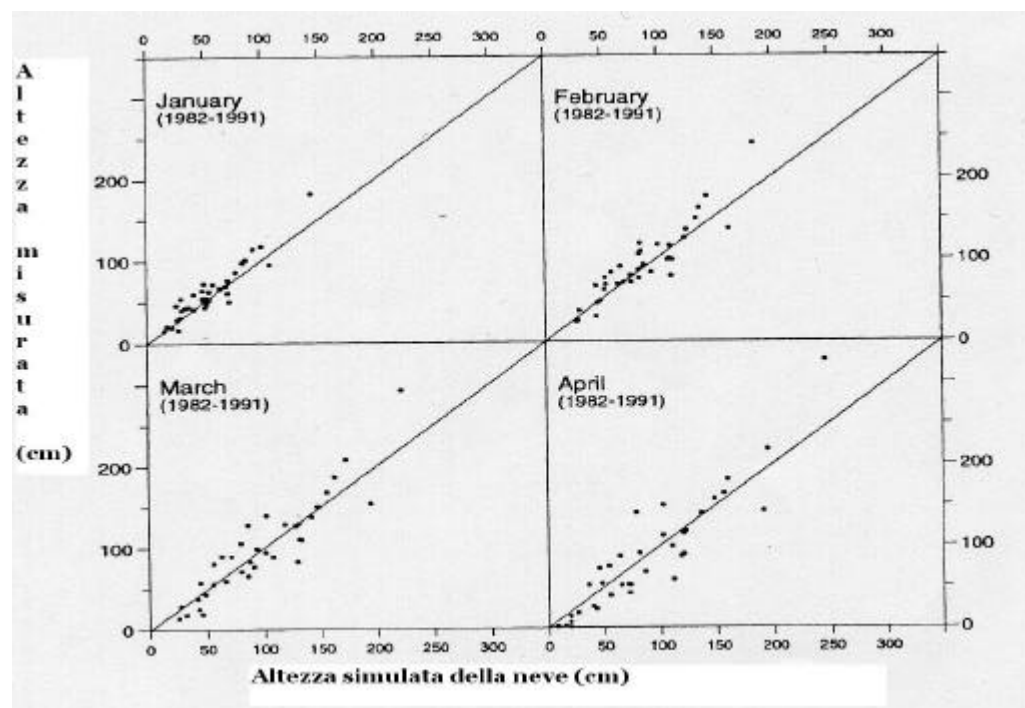
**Figura 3.4.1.1:** Confronto fra 10 anni (1981-1991) di misurazioni dell'altezza della neve misurate (curva a puntini) e simulate (curva continua) nella stazione sciistica di Tignes, nel massiccio montuoso della Vanoise in Francia (Adattato dalla rivista *Journal of Glaciology*, Vol. 45, No. 151, 1999)

Sempre in riferimento alla Figura 3.4.1.1, si possono notare errati gradi di composizione interna del manto nevoso, specialmente nei mesi di Marzo 1982 e 1983 e nei mesi di Febbraio-Marzo 1987; questi errori sono dovuti principalmente alla non accurata stima della densità iniziale e dei parametri caratterizzanti i cristalli della neve fresca appena caduta.

Sono visibili inoltre, alcuni errori nelle quantità di precipitazioni nei mesi di Dicembre 1981, Marzo-Aprile 1986 e Aprile 1989. Queste inesattezze sono spesso collegate agli errori effettuati nella determinazione oraria del limite verticale fra pioggia e neve.

L'impossibilità di correggere le altezze di neve simulate con le osservazioni locali è evidente durante alcuni inverni, come il 1982-83 o il 1985-1986. Queste stagioni, in particolare mostrano una curva diagonale dovuta ad un errore iniziale.

I diagrammi della Figura 3.4.1.2, che appartengono ad una pubblicazione di Martins ed altri del 1994, generalizzano queste indicazioni.



**Figura 3.4.1.2:** Diagrammi delle altezze di neve misurate e simulate in 37 diverse località e periodi (Adattato dalla rivista *Journal of Glaciology*, Vol. 45, No. 151, 1999)

In questi grafici compaiono le osservazioni di 37 siti diversi e vengono rappresentate le altezze di neve misurate manualmente (sull'asse delle ordinate) e quelle simulate attraverso il modello CROCUS (sull'asse delle ascisse) per periodi di 4 mesi. Si può notare, osservando questi grafici la stretta corrispondenza fra i valori nella maggior parte dei siti; soltanto in Aprile si ha un'errata simulazione del manto nevoso, quando nella realtà esso era completamente scomparso.

Generalmente gli errori commessi nei 37 siti erano minori di 20 cm nei siti al di sotto dei 1500 m.s.l.m. e di 30 cm per gli altri siti durante l'inverno (dal 15 Dicembre sino alla fine di Aprile). Questi risultati sono stati poi confermati utilizzando i valori calcolati con il sistema SAFRAN/CROCUS come dati in ingresso per il modello idrologico HBV dell' Istituto Tecnologico Federale Svizzero (Braun et al, 1994).

### ≡≡ **Validazione delle simulazioni stratigrafiche**

L'affinità tra i profili simulati con il sistema SAFRAN/CROCUS e le misure effettuate direttamente nella neve non può essere valutata unicamente attraverso un unico parametro. Essa va verificata in un campo di diverse variabili, quali la stratigrafia, il profilo di temperatura, il contenuto in acqua liquida e la densità.

Sono state effettuate varie prove di simulazione stratigrafica e una delle più approfondite è stata effettuata nella stazione sciistica di La Plagne-Montchavin, sfruttando le numerose osservazioni settimanali effettuate dagli addetti alla manutenzione delle piste. Nonostante la difficoltà nel catalogare le numerose osservazioni (dovuta ad incertezze riguardanti gli orari effettivi delle rilevazioni, località esatte e alternanza di osservatori), è stata constatata un'ottima verosimiglianza fra i risultati simulati e quelli direttamente osservati. In

particolare, i migliori risultati si sono avuti con le simulazioni di temperatura durante i mesi invernali, nonostante una leggera tendenza del modello numerico a fornire profili con temperature più fredde nel periodo di scioglimento (quello primaverile in particolare).

Va segnalata però anche qualche incongruenza riscontrata, soprattutto fra la simulazione e le osservazioni dei diversi tipi di cristalli di neve: essi erano sfaccettati nelle osservazioni dirette e circolari nei risultati forniti dal modello. Inoltre, le osservazioni di grani di neve bagnata sono stati sistematicamente molto più numerosi di quelli simulati.

### ≪≪ **Validazione dell'altezza della neve e del gradiente di temperatura simulato**

A causa della mancanza di numerosi dati, non possono essere effettuati paragoni fra manti nevosi osservati e misurati in tutti i carotaggi effettuati. Con lo scopo di utilizzare la maggior parte di osservazioni disponibili e di convalidare così il modello numerico, sono state paragonate le altezze della neve ed i gradienti di temperatura simulati all'interno del manto nevoso, con i corrispondenti valori misurati direttamente. Come già accennato in precedenza, non è stata inserita alcuna caratteristica climatologica quale dato in ingresso nel sistema numerico. Il gradiente di temperatura inoltre, è una variabile molto importante dal momento che è quella che influisce sulla maggior parte degli strati nevosi a debole coesione. Nella Tabella 3.4.1.1 sono rappresentate le correlazioni fra queste caratteristiche del manto nevoso. I dati che hanno permesso di giungere ai risultati di questa Tabella sono stati ricavati attraverso lo studio di 701 profili di manto nevoso in 50 località diverse sparse in tutti i massicci montuosi francesi e



divisi in tre aree principali durante l'inverno 1996-97.

<i>Area</i>	<i>Numero di località</i>	<i>Numero di carotaggi</i>	<i>Media delle altezze della neve misurate (cm)</i>	<i>Media delle altezze della neve simulate (cm)</i>
<b>Alpi del Nord</b>	20	290	124,6	117,3
<b>Alpi del Sud</b>	17	240	145,5	124,5
<b>Pirenei</b>	13	171	139,2	107,2

<i>Area</i>	<i>Indice di Correlazione (altezze neve)</i>	<i>Media dei gradienti di temperatura misurati (<math>^{\circ}\text{Cm}^{-1}</math>)</i>	<i>Media dei gradienti di temperatura simulati (<math>^{\circ}\text{Cm}^{-1}</math>)</i>	<i>Indice di Correlazione (gradienti di temperatura)</i>
<b>Alpi del Nord</b>	0,65	-0,036	-0,041	0,84
<b>Alpi del Sud</b>	0,63	-0,040	-0,037	0,67
<b>Pirenei</b>	0,80	-0,029	-0,039	0,79

**Tabella 3.4.1.1:** Confronto fra le altezze della neve osservate e simulate ed i gradienti di temperatura verticali all'interno del manto nevoso per differenti località nelle Alpi Francesi e nei Pirenei ( 1996-'97) (Fonte: *Journal of Glaciology*, Vol. 45, No. 151, 1999)

Come si può notare, le altezze della neve sono sempre maggiori nella realtà che nelle simulazioni (nel caso specifico soprattutto nelle Alpi del Sud e nei Pirenei), ed il coefficiente di correlazione relativo è abbastanza basso. Questa differenza però, non è dovuta ad un difetto del modello di simulazione, ma principalmente al fatto che nell'inverno 1996-'97, quando sono state effettuate le misurazioni comparate ai risultati del modello, la maggior parte delle precipitazioni nevose è stata in Novembre, prima dell'inizio delle misurazioni dirette. Per quanto riguarda invece i gradienti di temperatura, i risultati della comparazione sono stati più soddisfacenti, a parte il basso valore dell'indice di correlazione ottenuto nelle Alpi del Sud che andrebbe approfondito più a fondo. Ciò ha reso possibile il calcolo di un realistico metamorfismo della neve associato ai risultati del modello numerico

e fornito agli addetti alla previsione del rischio di valanghe un ottimo strumento automatico.

### **3.4.2 – PROCESSO OPERATIVO PER L'UTILIZZO DEL MODELLO NUMERICO**

Il modello CROCUS, abbinato ai modelli SAFRAN e MÉPRA, è stato utilizzato sin dall'inverno 1991/'92 a mezzogiorno di ogni giorno per calcolare l'evoluzione del profilo del manto nevoso del giorno precedente in tutti i massicci montuosi delle Alpi Francesi e dei Pirenei.

Il processo comincia con la raccolta di numerose osservazioni manuali provenienti da diverse stazioni sciistiche in cui sono presenti stazioni locali di Météo France. Queste osservazioni sono generalmente effettuate alle ore 8.00 di mattina in ciascuna stazione e sono trasmesse telefonicamente ad un'unica stazione che le inserisce in diversi database dopo averne verificato l'attendibilità. Un'altra osservazione viene effettuata nel pomeriggio e anch'essa trasmessa. Parallelamente, vengono estrapolate altre informazioni, come immagini da radar, dati di stazioni automatiche, messaggi meteorologici e dati elaborati da modelli meteorologici. Tutta questa tipologia di informazioni è reperibile presso la sede del CEN a Grenoble.

Il sistema SCM inizia ad elaborare i dati alle ore 11 del mattino con la simulazione di tutte le condizioni meteorologiche e di tutti gli stati possibili della neve includendo il rischio di valanghe di tutti i massicci montuosi. La simulazione numerica copre un periodo di 24 ore a partire dalle ore 6 del mattino del giorno

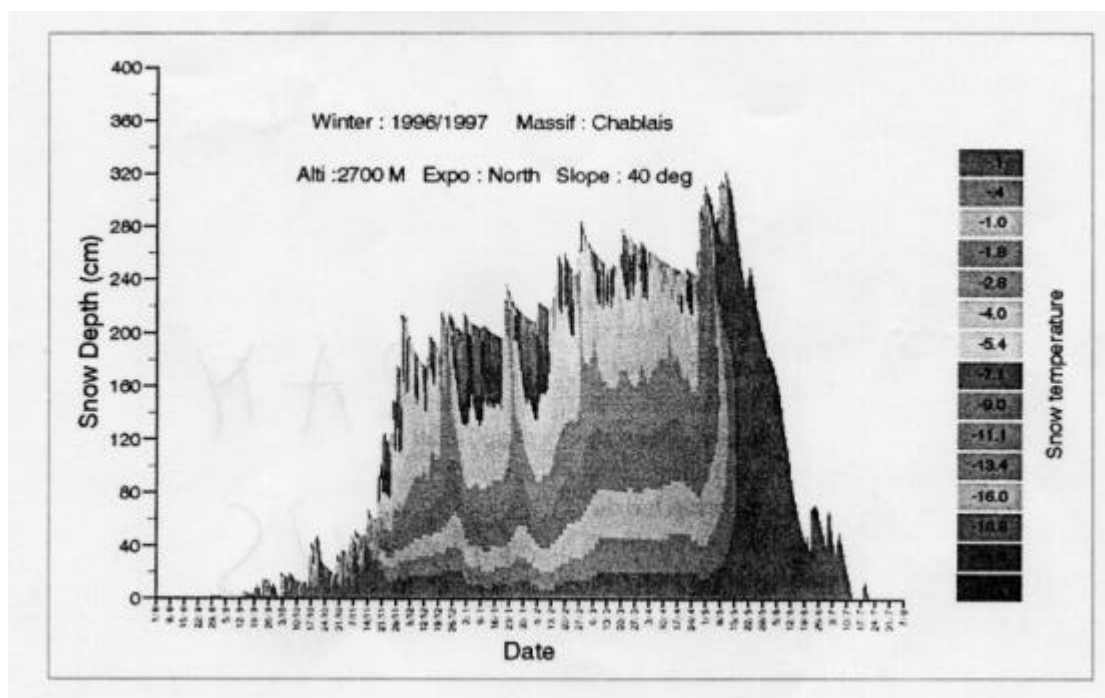
precedente. Tutti i risultati della simulazione sono disponibili ora per ora.

Per aiutare gli studiosi della previsione del rischio di valanghe ad interpretare i risultati del sistema SCM è stato sviluppato un software che permette loro di analizzare i dati meteorologici ed il manto nevoso simulato applicandolo alle condizioni particolari e alle caratteristiche di ciascun massiccio montuoso.

Tutti i modelli del sistema sono soggetti in ogni caso a continui sviluppi, grazie al continuo scambio di informazioni fra gli utilizzatori del sistema e gli addetti alla manutenzione e controllo delle piste da sci, che li aggiornano sulle loro osservazioni riguardanti l'attività valanghiva. I risultati ottenuti con i modelli inoltre, vengono sistematicamente utilizzati e comparati con i dati reali, soprattutto nel caso vengano aperte inchieste in occasione del verificarsi di vere valanghe. Questi paragoni aiutano a trovare le differenze fra i modelli e la realtà, anche se poi non è sempre semplice trovarne la causa. Come già accennato, non esiste un ritorno di segnale tra il sistema di modelli e le reali misurazioni riguardanti neve e valanghe; gli unici dati in ingresso sono le condizioni meteorologiche ed il sistema può essere corretto solo con la modifica di questi dati. Come esempio di risultati ottenuti con il modello CROCUS, nella Figura 3.4.2.1 è rappresentata la simulazione della continua evoluzione nel tempo della temperatura del manto nevoso riferita al massiccio montuoso dello Chablais a 2700 m.s.l.m., in particolar modo nel suo versante esposto a nord con una pendenza del versante di circa 40 gradi, effettuata nell'inverno 1996-'97.

Nella Figura 3.4.2.1 viene evidenziata, oltre all'evoluzione dell'andamento dell'altezza del manto nevoso nel corso della stagione invernale, anche la sua temperatura nei vari strati, dato molto difficile, se non impossibile, da rilevare

direttamente in loco con le normali strumentazioni, data la difficile accessibilità del sito.



**Figura 3.4.2.1:** Evoluzione della temperatura simulata con il modello CROCUS: sull'asse delle  $x$  è riportata la scala temporale, su quello delle  $y$  l'altezza della neve in cm. La temperatura della neve è rappresentata con le diverse gradazioni di grigio (Fonte: *Journal of Glaciology*, Vol. 45, No. 151, 1999)

### 3.4.3 – PUNTI DEBOLI DEL MODELLO

Come già accennato, il modello CROCUS non viene utilizzato da solo, ma è abbinato all'utilizzo dei modelli SAFRAN e MÉPRA. In ogni caso, le cause delle imprecisioni dei risultati forniti dai modelli sono abbastanza comuni a tutti e tre i modelli del sistema.

Uno dei motivi principali di queste imprecisioni è collegato alla perdita di dati o ad erronee misurazioni (a volte succede con le strumentazioni automatiche). In questi casi è possibile cambiare i risultati del modello modificando i dati meteorologici in ingresso, oppure facendo ripartire la modellazione dalla data dell'errore.

Alcuni problemi però, non sono sempre direttamente collegati a dati in ingresso errati; possono essere anche dovuti a difetti dei modelli.

Si sono verificate situazioni in cui i profili simulati del manto nevoso differivano molto dalle osservazioni effettuate direttamente in loco. Ciò è attribuibile alla scarsità di osservazioni meteorologiche relative a quote elevate e versanti esposti a sud. Attualmente, non c'è modo di correggere le grandi differenze fra valori simulati e valori osservati in questi casi e quindi, risulta impossibile modificare, con correzioni coerenti per tutti gli elementi fisici e stratigrafici, tutti i profili simulati a differenti quote e pendenze utilizzando soltanto i pochi carotaggi effettuati in località sparse.

Nonostante queste limitazioni, coloro che prevedono il rischio di valanghe in Francia, hanno constatato che il sistema SCM li aiuta ad analizzare le variabili spaziali della struttura del manto nevoso per un ampio numero di quote e pendenze. Durante l'inverno (da Novembre a Maggio in particolare) infatti, riescono ad ottenere simulazioni realistiche dei limiti del manto nevoso, delle altezze, delle località luogo di metamorfismi dovuti ad alti gradienti di temperatura, di profili di neve bagnata o ricongelata e di naturali o accidentali rischi di valanghe. Per ciò che concerne il modello CROCUS in particolare, durante l'inverno quando i carotaggi settimanali sono abbastanza numerosi, i dati elaborati da questo modello sono molto utilizzati come complemento alle osservazioni dirette: grazie a ciò è possibile ottenere informazioni continue e sicure sull'evoluzione dello stato interno del manto nevoso oggetto di carotaggi e, attraverso queste, ottenerne altre riguardanti manti nevosi situati a quote e pendenze dove le misurazioni dirette non sono disponibili. Il modello CROCUS

aiuta inoltre coloro che si occupano di prevedere il rischio di valanghe ad individuare il campo di quote ed i diversi aspetti per i quali ci si può attendere una forte influenza sulle caratteristiche del manto nevoso: per esempio, la formazione di strati nevosi a debole coesione dovuti a variazioni termiche, il consolidamento della neve fresca, le fasi di gelo e ri-gelo. All'inizio dell'inverno (da Novembre fino a metà Dicembre) o alla fine (da metà Aprile sino a Maggio), le osservazioni di neve e valanghe sono rare ed il modello CROCUS si è dimostrato un'affidabile fonte di informazioni sulle strutture del manto nevoso.

Un'ultima limitazione del modello, ma non per questo meno importante, è quella di non simulare l'accumulo e l'erosione della neve da parte del vento, attività quest'ultima che può modificare significativamente le condizioni delle neve in determinate zone. E proprio questo è uno dei problemi che si cercherà di risolvere con gli sviluppi futuri dei modelli numerici.

### **3.5 – IL MODELLO NUMERICO “SNOWPACK”**

Il modello numerico SNOWPACK è stato realizzato dall'Istituto Federale Svizzero per la ricerca su neve e valanghe di Davos (Svizzera). Anche questo modello, come già visto con il modello CROCUS, è uno strumento di fondamentale importanza per gli addetti alla previsione del rischio di valanghe, fornendo loro informazioni supplementari sullo stato del manto nevoso, soprattutto nei casi non rari di cattive condizioni meteorologiche o condizioni pericolose per le misurazioni dirette da effettuarsi tramite carotaggi.

Lo SNOWPACK risolve numericamente le equazioni differenziali alle derivate parziali che governano la massa, l'energia e la conservazione della quantità di

moto all'interno del manto nevoso utilizzando il metodo degli elementi finiti. La realizzazione di questo modello è stata fatta in particolar modo per offrire un ulteriore strumento di aiuto per la soluzione dei problemi riguardanti il pericolo di valanghe.

Il modello utilizza i dati meteorologici provenienti da numerose stazioni nivometeorologiche: in questo modo può simulare il manto nevoso per diverse ore ma anche giorni, settimane, mesi o addirittura anni. Per quanto riguarda lo studio dei rischi di valanghe, però sono molto importanti le simulazioni a breve termine. Ciò significa che la simulazione deve essere per forza fermata in caso di mancanza di dati meteorologici e fatta ripartire non appena essi tornano ad essere disponibili. In ogni caso, i dati delle precedenti simulazioni non vengono cancellati fino a quando possono servire per la simulazione successiva.

L'interesse principale di coloro che si occupano di previsione del rischio di valanghe è rivolto alla stratigrafia del manto nevoso: in particolare essi vogliono localizzare gli strati di neve a debole coesione, quelli che più facilmente possono essere causa di una valanga. A questo scopo, lo SNOWPACK traccia le proprietà micro-strutturali del manto nevoso utilizzando il gradiente di temperatura ed i processi di metamorfosi della neve. Le relazioni costitutive come la viscosità, che governa la composizione della neve, la conduttività termica, che regola il trasporto di energia all'interno del manto nevoso, sono formulate in termini sia delle proprietà microscopiche che macroscopiche della neve e sono, perciò, di tipo non lineare. È importante evidenziare che, al fine di tracciare i vari strati del manto nevoso, il modello numerico deve utilizzare un sistema di coordinate denominato "a formulazione Lagrangiana".

---

L'influenza quantitativa della radiazione solare o di forti venti caldi (ad esempio il FÖHN) nei confronti della stabilità del manto nevoso è difficile da prevedere a causa dei complessi scambi di energia sulla superficie nevosa. La determinazione della superficie di scioglimento ed il trasporto dell'acqua prodotta attraverso il manto nevoso è essenziale per la previsione di valanghe di neve bagnata. Inoltre l'acqua prodotta dallo scioglimento della neve spesso ricongela formando strati di neve ghiacciata. Nel modello SNOWPACK, in tutti i cambiamenti di fase si conservano i bilanci di massa ed energia. La neve è considerata un materiale poroso a tre componenti (ghiaccio, acqua e vapore acqueo): le fasi cambiano tra ghiaccio e acqua (superficie di scioglimento e ricongelamento) e fra ghiaccio e vapore acqueo (deposizione e sublimazione dei reticoli di ghiaccio).

L'erosione del vento può rimuovere masse elevate dal manto nevoso, così come lo scorrere dell'acqua di scioglimento e la sublimazione del vapore acqueo. Finché la formazione di valanghe è strettamente collegata al movimento della neve, è necessaria la considerazione della massa fisicamente erosa dalla superficie nevosa. Dal punto di vista della modellazione numerica, questo significa rimuovere gli elementi finiti dalla superficie, basandosi su alcuni criteri di erosione. Lo SNOWPACK è in grado anche di simulare l'ablazione rimuovendo gli elementi di superficie che contengono solo acqua (nel caso in cui la fase ghiaccio sia completamente sciolta). L'acqua scorre verso il basso, riscaldando la neve ed in un manto nevoso isotermico raggiunge l'ultimo strato e poi scorre sul terreno.

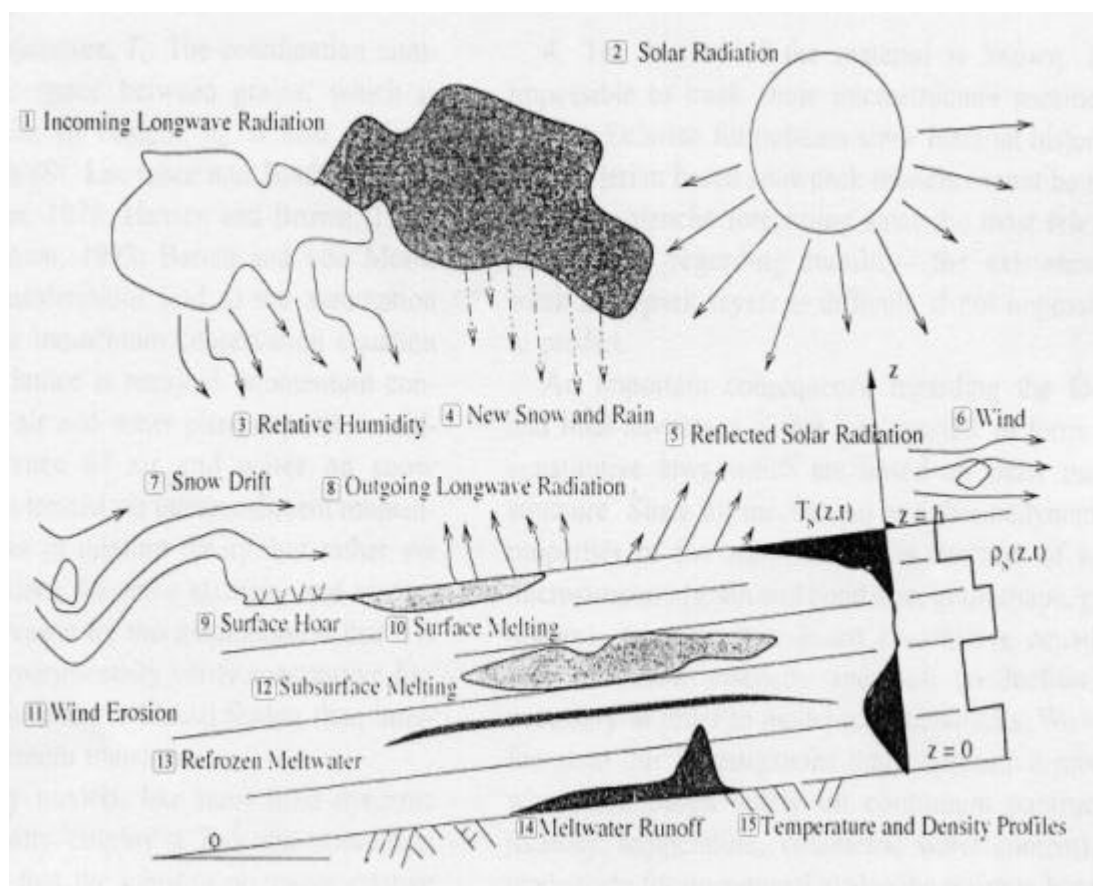
Numerosi modelli numerici sono stati realizzati prima dello SNOWPACK, la maggior parte dei quali è basata su teorie che applicano postulati ed equazioni di conservazione di ghiaccio, acqua, vapore acqueo ed aria, i costituenti naturali del



manto nevoso. Tutti questi modelli però, a causa della complessità matematica di queste teorie, assumono diversi tipi di semplificazioni, come il considerare solo tipi di neve prive di contenuto in acqua, oppure con metamorfismo nullo. Una delle peculiarità del modello SNOWPACK è, invece quella di non ammettere alcuna semplificazione di quel genere nelle sue applicazioni operazionali riuscendo, così a simulare tutta la complessità del manto nevoso naturale.

### 3.5.1 – LA MODELLIZZAZIONE

La Figura 3.5.1.1 mostra un manto nevoso multistrato e molti dei processi fisici che vengono modellizzati dallo SNOWPACK.



**Figura 3.5.1.1:** Processi fisici importanti nella modellizzazione SNOWPACK (Da P. Bartelt e M. Lehning, *Cold Regions Science and Technology* 35 (2002) 123-145)

#### **Legenda Figura 3.5.1.1**

1. Radiazioni incidenti ad onde lunghe
2. Radiazione solare
3. Umidità relativa
4. Pioggia e neve nuove
5. Radiazione solare riflessa
6. Vento
7. Cumuli di neve
8. Radiazioni uscenti ad onde lunghe
9. Brina di superficie
10. Fusione della superficie del manto nevoso
11. Erosione del vento
12. Fusione del rimostrato del manto nevoso
13. Acqua di fusione ricongelata
14. Scorrimento dell'acqua di fusione
15. Profili di temperatura e densità

Viene denominato  $Z$  l'asse perpendicolare ad un pendio con angolo di inclinazione  $\theta$ .  $Z=0$  definisce la base del manto nevoso mentre  $Z=h$  la sua superficie. Lo scopo è di trovare, ad un determinato istante di tempo  $t$ , le proprietà fisiche del manto nevoso, ad esempio la distribuzione verticale di temperatura  $T_s(z,t)$  oppure la densità dei vari strati del manto nevoso  $P_s(z,t)$ . Nel modello unidimensionale SNOWPACK si assume che tutti i movimenti di scorrimento fra piani paralleli ed i flussi d'acqua siano nulli così pure tutti i gradienti (di temperatura e pressione di vapore). Ogni strato nevoso viene descritto utilizzando 3 costituenti principali: ghiaccio, acqua ed aria umida. Ciascuno strato di neve è definito dalle frazioni volumetriche  $\alpha_i$ ,  $\alpha_w$  e  $\alpha_a$  ( $i = 1 =$  ghiaccio,  $w = 2 =$  acqua,  $a = 3 =$  aria umida). Per definizione, la frazione volumetrica è compresa fra 0 e 1 e  $\alpha_i + \alpha_w + \alpha_a = 1$ . Quest'ultima relazione viene fatta valere rigidamente per tutte le operazioni di assestamento, cambiamento di fase e trasporto di massa. Le costanti intrinseche sono definite per unità di costituente di volume, per esempio, la densità del ghiaccio  $P_i$  e vengono utilizzate per definire tutte le variabili microscopiche. Ad esempio,  $P_s = P_i\alpha_i + P_w\alpha_w + P_a\alpha_a$  dove  $P_s$  è la densità della neve,  $P_w$  e  $P_a$  sono le densità dell'acqua e dell'aria umida rispettivamente.

Ad un fissato istante, si assume che i costituenti ghiaccio, acqua e aria umida abbiano la stessa temperatura che viene denominata "temperatura di volume"  $T_v$ . Questa assunzione è valida finchè le condizioni meteorologiche limite (radiazioni ad onde lunghe e corte, trasferimenti di calore sensibile e latente) sono definite come scambi di energia di massa sulla superficie del manto nevoso. Definire gli scambi di energia per ciascuna fase costituente (sulla superficie del manto nevoso o fra diverse fasi) sarebbe teoricamente possibile, ma è molto difficile, se non

---

impossibile, fare verifiche sperimentali, specialmente sul campo. Le stazioni meteorologiche automatiche misurano una singola temperatura. Perciò, per determinare la distribuzione verticale di temperatura  $T_s(z,t)$  all'interno del manto nevoso, viene postulata una sola equazione di energia di massa. Fondamentalmente, si assume che gli scambi di energia fra gli strati costituenti nella neve avvengano a velocità molto maggiori degli scambi di energia sulla superficie del manto nevoso. Questa assunzione riduce altresì le richieste di calcolo del modello.

Tutte le fasi di disgelo ed i processi di trasporto di vapore acqueo negli strati intermedi rispettano di conseguenza i bilanci di conservazione di energia e di massa. Quando il ghiaccio si scioglie ( $T_s = 0\text{ °C}$ ,  $\dot{q}_i > 0$ ) o l'acqua di disgelo ricingela ( $T_s < 0\text{ °C}$ ,  $\dot{q}_w > 0$ ) i termini di energia vengono posti nella parte destra delle equazioni di bilancio di energia di massa che verranno esposte in seguito, e sono proporzionali ai cambiamenti dei costituenti la massa. L'energia proveniente dai cambiamenti di massa limita il campo di temperatura  $T_s(z,t)$  alla temperatura di scioglimento/ ricingelamento  $T_s = 0\text{ °C}$ . Una simile procedura viene anche applicata fra le fasi di ghiaccio ed aria umida: la massa di vapore acqueo si deposita sulla fase di ghiaccio solido al punto che la pressione di vapore della neve  $p_a(z,t)$  non è mai maggiore della pressione di vapore completamente saturo  $p_s(z,t)$ . Inoltre, il modello calcola i cambiamenti di massa (sotto forma di crescita dei grani) e la riserva di energia supplementare che sono richiesti per far rispettare il vincolo di pressione,  $p_a(z,t) = p_s(z,t)$ . Il manto nevoso può essere poco saturato e la distribuzione della pressione di vapore è governata dall'equazione di diffusione del vapore.

Si assume che il peso proprio del manto nevoso sia sostenuto interamente dal reticolo di ghiaccio solido. La tensione della neve,  $\tau_s(z,t)$  è un valore intermedio, che può variare significativamente in base alla tensione microstrutturale del legame di grani,  $\tau_b(z,t)$ . L'aria o l'acqua che circondano il reticolo di ghiaccio non si oppongono direttamente al movimento. La resistenza del legame dei grani, tuttavia, è direttamente collegata al contenuto di acqua liquida  $\rho_w$ , ed alla temperatura di volume,  $T$ . Anche lo spazio libero fra i grani, che è proporzionale al contenuto di aria,  $\rho_a$ , è molto importante per la resistenza della neve (St. Lawrence e Bradley, 1975; Kry, 1975; Gubler, 1978; Hansen e Brown, 1987; Mahajan e Brown, 1993; Bartelt e Von Moos, 2000).

Queste considerazioni portano all'assunzione che per descrivere il reticolo di ghiaccio solido è richiesta solo una singola equazione della conservazione della quantità di moto. L'equazione di conservazione della quantità di moto per le fasi di aria ed acqua non vengono prese in considerazione. L'influenza di aria e acqua sulla deformazione della neve non viene trattata attraverso le variazioni di quantità di moto interne, piuttosto per mezzo delle equazioni costitutive che riguardano l'elasticità e la viscosità della neve. Il primo motivo di questa scelta è che in questo modo è molto più facile verificare sperimentalmente le formulazioni costitutive, ad esempio attraverso tests triassiali.

I modelli teorici di miscela, come le principali applicazioni fluidodinamiche, utilizzano normalmente un sistema di coordinate Euleriane. Questo approccio non è seguito nel modello SNOWPACK. Viene, invece impiegato un sistema a coordinate Lagrangiane che segue la matrice di ghiaccio. Sono quattro i vantaggi principali della formulazione in coordinate Lagrangiane dell'equazione di

---

conservazione della quantità di moto per i costituenti del ghiaccio.

1. Se il campo di spostamenti calcolato è continuo (come avviene nel metodo degli elementi finiti), l'equazione di continuità della massa della fase ghiaccio viene automaticamente rispettata. Inoltre, nel sistema a 3 costituenti, sono richieste solo due equazioni di conservazione della massa, una per la fase acqua ed una per la fase vapore.
2. Poiché in una formulazione Lagrangiana è richiesta la continuità del campo di spostamenti, sono possibili discontinuità nella densità degli strati (un elemento finito può avere una densità diversa da un elemento adiacente). In una formulazione Euleriana, l'equazione di conservazione della massa rinforza la continuità del campo di densità, e ciò è fisicamente non realistico.
3. La posizione della superficie del manto nevoso è determinabile esattamente: in questo modo, il trattamento delle condizioni limite termiche e di massa (nel caso di neve nuova) è molto semplificato.
4. La storia del materiale è conosciuta. E' impossibile tracciare i parametri della microstruttura della neve utilizzando una formulazione Euleriana se la storia del materiale è perduta. I modelli di simulazione del manto nevoso basati su coordinate Euleriane non possono essere utilizzati per la previsione di valanghe dal momento che le più importanti informazioni riguardanti la stabilità e l'esistenza di strati di neve poco resistenti è difficile, se non impossibile, da prevedere.

Un' importante conseguenza riguardante il quarto ed ultimo vantaggio è che è possibile formulare leggi costitutive basate sulla microstruttura della neve. Poiché

tutte le proprietà meccaniche e termodinamiche del manto nevoso sono funzione della microstruttura della neve (dimensioni dei grani di neve e dei loro legami, tipo di grano di neve e la sua storia), le equazioni costitutive basate sulla microstruttura riguardanti sia la viscosità della neve che la conduzione di calore sono necessarie al fine di modellizzare realmente i manti nevosi.

I ricercatori dell'Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe di Davos hanno scoperto che i modelli costitutivi basati unicamente su parametri continui (densità, temperatura, contenuto volumetrico di acqua) sono inadeguati per le previsioni operative sul pericolo di valanghe, perché non possono modellizzare accuratamente la stratigrafia del manto nevoso. Per esempio, se vengono applicate leggi di viscosità non basate sulla microstruttura della neve, il profilo di densità calcolato aumenta con la profondità della neve. Ciò non concorda con le osservazioni fatte nelle buche di neve, dove si è verificato che possono esistere densità minori negli strati interni del manto nevoso. Tuttavia, il pre-requisito per modellizzare questo limite è che la microstruttura della neve dipende da diversi parametri ed esistono leggi che descrivono come questi parametri variano in funzione della temperatura e del gradiente di temperatura.

Ecco infine la formulazione delle principali equazioni su cui si basa il modello SNOWPACK:

**≈≈ EQUAZIONE DELLA TEMPERATURA DI VOLUME  
(Conservazione dell'energia)**

$$P_s(z,t)c_s(\rho, z, t) \frac{\partial T_s(z,t)}{\partial t} + k_c(\rho, z, t) \frac{\partial^2 T_s(z,t)}{\partial z^2} = Q_{pc}(z,t) + Q_{sw}(z,t) + Q_{mm}(z,t)$$

Dove  $P_s$  è la densità della neve e  $c_s$  è il calore specifico della neve a pressione costante,

$$P_s c_s = P_i c_i + P_w c_w + P_a c_a,$$

$k_e$  è la conduttività di volume, che viene usualmente espressa come

$$k_e = k_i + k_w + k_a$$

$Q_{pc}$  è un termine energetico che tiene conto della fusione e del ricongelamento, rispettivamente,  $Q_{sw}$  rappresenta il termine di energia a onde corte, mentre  $Q_{mm}$  l'energia della diffusione di vapore.

### ≡≡ EQUAZIONE DELLA DIFFUSIONE DI VAPORE (Conservazione della massa della fase aria)

$$\frac{\partial}{\partial t} (P_a(z,t)) + \frac{\partial}{\partial z} (J_v(z,t)) = M_{mm}(z,t)$$

dove  $J_v$  è il flusso di vapore acqueo e  $M_{mm}$  è un termine di massa dovuto al deposito o sublimazione del vapore acqueo sulla matrice di ghiaccio.

### ≡≡ EQUAZIONE DEL TRASPORTO DI ACQUA (Conservazione della massa della fase acqua)

$$\frac{\partial}{\partial t} (P_w) + \frac{\partial}{\partial z} (J_w) = M_{pc}$$

dove  $J_w$  è il tasso di flusso di acque per unità di area e  $M_{pc}$  è un termine che tiene

---



conto del cambiamento di fase (per unità di volume)

### ≪≪ EQUAZIONE DI CHIUSURA

(Conservazione del momento della quantità di moto della fase ghiaccio)

$$\frac{\partial \tau_s(z,t)}{\partial z} + P_s(z,t)g \cos \theta = 0$$

dove  $\tau_s$  è la tensione normale sul pendio,  $g$  è l'accelerazione gravitazionale e  $\theta$  è l'angolo di inclinazione.

## 3.5.2 – ARCHITETTURA

Il modello SNOWPACK risolve le equazioni di bilancio di massa ed energia utilizzando uno schema numerico ad Elementi Finiti. E' scritto nel linguaggio di programmazione "C" ed è distribuito con un'interfaccia intuitiva in "Java". L'interfaccia è utilizzata per guidare il modello con parametri in ingresso e per visualizzare facilmente i risultati. Sono disponibili una varietà di risultati e di opzioni grafiche. SNOWPACK è disponibile sia per i sistemi operativi Windows che UNIX. Vengono modellizzati i seguenti processi individuali:

- ?? Scambi di calore
- ?? Assestamenti del manto nevoso
- ?? Cambiamenti di fase
- ?? Trasporto di acqua
- ?? Metamorfismo della neve

I trasferimenti di energia e di massa sulla superficie del manto nevoso sono modellizzati tenendo in considerazione:

- ?? Precipitazioni di neve o pioggia
- ?? Radiazioni ad onde corte
- ?? Radiazioni entranti e riflesse ad onde lunghe
- ?? Flusso di calore sensibile
- ?? Flusso di calore latente inclusa la formazione di brina sulla superficie
- ?? Effetti del vento
- ?? Cumuli di neve

### **3.5.3 – APPLICAZIONI**

Il modello numerico SNOWPACK è stato sviluppato principalmente con lo scopo di prevedere il pericolo di valanghe. Il suo maggior pregio è la descrizione della stratigrafia del manto nevoso e della microstruttura della neve. Con lo SNOWPACK vengono modellizzati strati di neve a debole coesione e varie interfacce come la superficie bianca (per esempio la brina), la superficie più profonda (quella a contatto col terreno) o strati di ghiaccio. Proprio per i suoi accurati bilanci di massa ed energia, lo SNOWPACK viene utilizzato sempre più anche nelle ricerche climatologiche. Una nuova caratteristica è la possibilità di modellizzare anche strati di terreno o di roccia ( a profondità variabili). Questa applicazione è destinata alle simulazioni sul “permafrost”. Il modello SNOWPACK fa anche una descrizione dettagliata delle interazioni con i vari strati dell’atmosfera. Tratta, inoltre, processi complessi come il soffiare del vento

e tormente di neve. Una speciale attenzione è rivolta al trattamento della penetrazione nella neve delle radiazioni ad onde corte. Perciò, il modello SNOWPACK è sfruttabile per analisi dettagliate dei flussi di energia e di massa fra gli strati atmosferici e la criosfera. In questo ultimo caso l'applicazione è destinata alla ricostruzione dei processi fisici che avvengono nei nuclei di ghiaccio. Nella Figura 3.5.3.1 è rappresentata la simulazione effettuata con il modello SNOWPACK durante la valanga catastrofica avvenuta nel Cantone del Vallese in Svizzera nell'inverno del 1999. I risultati concordano molto bene con le osservazioni dirette effettuate nello stesso periodo. I grani di neve nuova di tipo dentritico sono rappresentati in verde e indicati con il simbolo “++”, mentre i grani sciolti sono indicati con il simbolo “? ?”. Gli strati di cristalli sfaccettati sono mostrati in blu.

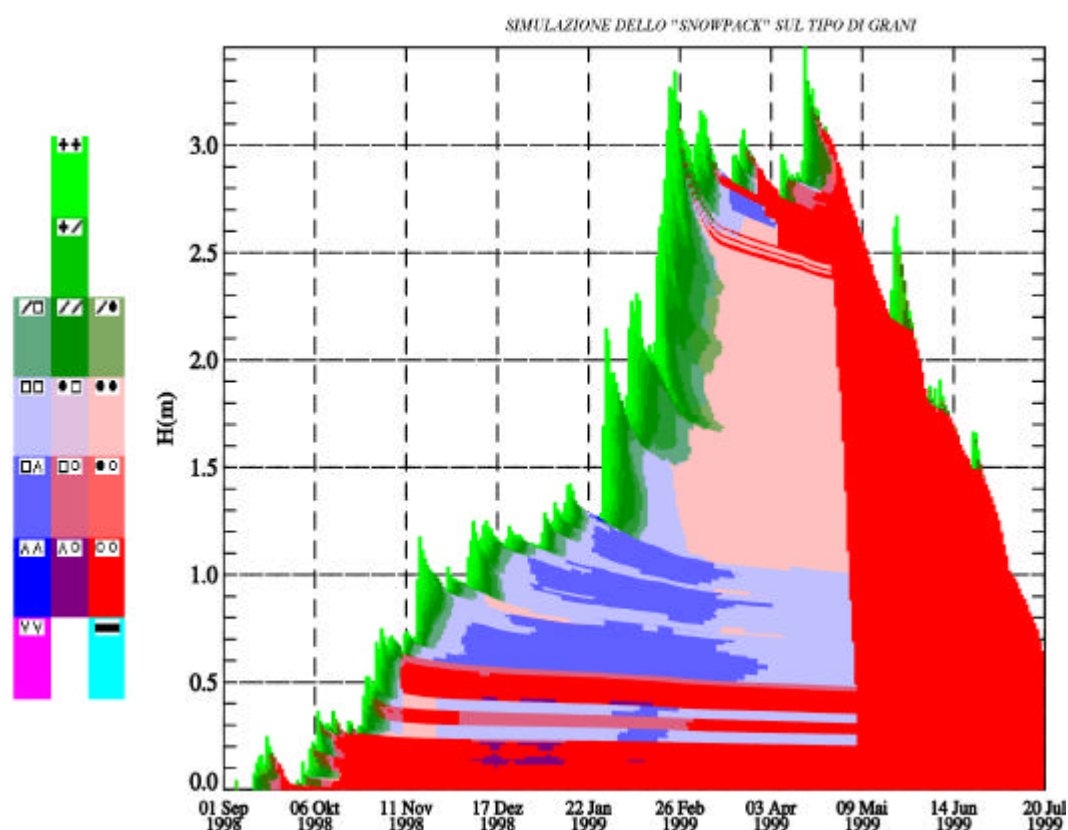


Figura 3.5.3.1: Il colore verde simboleggia neve nuova con variazioni fra grani di neve arrotondata (in rosso e grani di neve sfaccettata (in blu) (Fonte: Cold Regions Science and Technology 35 (2002) 169-184)

### **3.5.4 –LA MICROSTRUTTURA DELLA NEVE NEL MODELLO SNOWPACK**

Il modello di simulazione del manto nevoso SNOWPACK include un modello dettagliato di microstruttura della neve e di metamorfismo. In SNOWPACK la complessa struttura della neve è descritta usando 4 parametri della microstruttura primaria: la misura del grano, la dimensione delle loro aggregazioni, la dendricità e la sfericità. Per ogni parametro le equazioni di base sono fondate su considerazioni teoriche, quali la teoria della mescolanza della neve e le sue relazioni empiriche. Secondo uno schema di classificazione, i tipi convenzionali di grani di neve sono predetti sulla base di questi parametri. L'approccio al legame tra proprietà costitutive della massa nevosa, viscosità e conduttività termica con i parametri della microstruttura sono insolite nel campo della modellizzazione del manto nevoso. Viene presentata una descrizione completa di quelle quantità applicabili al manto nevoso stagionale. Questo include la significativa unione fra processi fisici della neve: la dimensione delle aggregazioni nevose, che cambia non solo attraverso processi metamorfici, ma anche attraverso il processo di sinterizzazione della pressione (incluso nella formulazione della viscosità), è al tempo stesso l'unico parametro importante per la viscosità della neve e la conduttività termica. Risultati di laboratorio hanno confermato la validità di questa formulazione.

### **3.5.5 – IL MODELLO SNOWPACK ED I FENOMENI METEOROLOGICI, SIMULAZIONE DELLA FORMAZIONE DEI MANTI NEVOSI SOTTILI**

Lo sviluppo del manto di neve stagionale è completamente influenzato dalle condizioni atmosferiche. SNOWPACK usa l'altezza misurata della neve per determinare i tassi di precipitazione nevosa attraverso i tassi di assestamento calcolati. Questo richiede un algoritmo di controllo rigido dei dati. Viene usato un nuovo modello statistico per calcolare la densità della neve fresca come funzione delle condizioni atmosferiche misurate. Un modello statistico è calibrato anche in base all'albedo delle neve, che è necessario per determinare la radiazione assorbita. Le parametrizzazioni del flusso di calore sensibile e latente sulla superficie sono ricavati dalla similarità studiata da Monin-Obukhov e includono una formulazione che tiene conto della variabile vento. Le formulazioni vengono anche adattate in funzione delle condizioni della neve. La nuova indicazione ha a che fare con l'osservazione della diverse altezze di scabrezza per scalari e quantità di moto sulla neve. E' fondamentale, specialmente per lo scambio di calore latente, una formulazione accurata, perché lo scambio di calore latente determina la formazione di cristalli di brina, uno strato sottile ma molto importante. E' considerato anche l'effetto del vento sulla conduttività termica degli strati superiori di neve. Nel modello SNOWPACK le formulazioni su energia di superfici e scambio di massa sono valutati considerando la formazione di sottili strati di brina e di incrostazioni di ghiaccio. Questi strati vengono simulati molto

dettagliatamente. Oltre a ciò, il completo sviluppo del profilo del manto nevoso è modellato per i parametri relativi al tipo di grano, alla temperatura, alla densità, alla misura del grano e al contenuto di acqua liquida.