

**GIAN CARLO ROSSI**

C.A.I. - Commissione Scientifica del Comitato Veneto-Friulano Giuliano (VE Mestre)  
Ricercatore presso l'Unità Idro-Geologia Impiantistica del Centro Ricerche Idrauliche e  
Strutturali (CRIS) della Direzione Studi e Ricerche dell'ENEL S.p.A. (VE-Mestre).

## **RICERCHE GLACIOLOGICHE ED AMBIENTALI SUI BACINI VALDOSTANI**

### **Premessa**

I bacini idrologici di tipo nivoglaciale rivestono una notevole importanza per il regime degli apporti idrici: infatti gli apparati glaciali, anche se di estensione limitata (fino a 1 % della superficie totale) esercitano un ruolo mitigatore sulla variabilità interannuale degli apporti derivanti dalle precipitazioni. La copertura nevosa e glaciale svolge inoltre un ruolo importante nella dinamica dei processi che avvengono nell'atmosfera per effetto delle interazioni tra i composti chimici di origine naturale o antropogenica e l'acqua, presente nei tre stati di aggregazione. Le masse glaciali, conservando in maniera sequenziale le tracce degli eventi fissati nelle deposizioni nevose accumulate, costituiscono degli archivi di informazioni climatiche ed ambientali la cui decodifica può contribuire alla conoscenza dell'evoluzione del sistema climatico nel passato prossimo.

Le ricerche intraprese hanno lo scopo di approfondire sia gli aspetti idrologici connessi alla valutazione delle risorse idriche che quelli ambientali del presente e del recente passato.

### **1.0 Descrizione delle Attività**

Il CRIS Servizio Idrologico dell'ENEL ha attualmente in corso due programmi di ricerca scientifica in aree alpine glaciali. Il primo

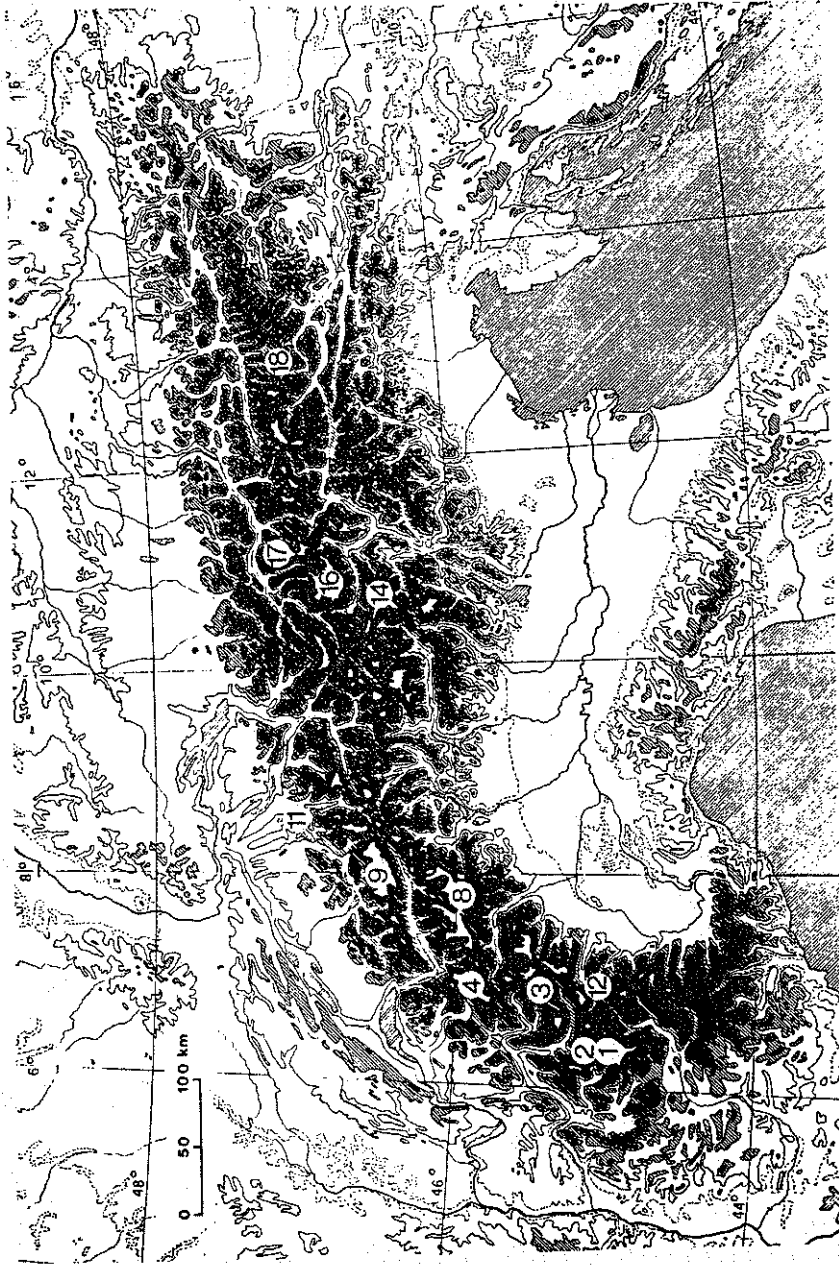
riguarda lo studio dell'influenza delle fluttuazioni climatiche sul regime degli apparati glaciali, e di conseguenza anche sulle relative producibilità idroelettriche, con particolare riferimento a due tipici bacini nivoglaciali dell'arco alpino: i ghiacciai del versante meridionale del Monte Rosa (Lys Occ. ed Orient., Felik ed Indren) ed i ghiacciai della testata della valle della Mare nel gruppo dell'Ortles-Cevedale (Vedretta della Mare e Vedretta Careser).

Il secondo progetto ha una valenza più ambientale, in quanto riguarda lo studio delle deposizioni veicolate dalle precipitazioni nevose in ambiente alpino. Esso si realizza attraverso la partecipazione ad un progetto internazionale denominato ALPTRAC (acronimo di High Alpine Aerosol and Snow Chemistry Study), che è un sottoprogetto di EUROTRAC, il quale, a sua volta, fa parte del progetto scientifico della Comunità Europea EUREKA nell'area ambientale. Questo progetto ha avuto una durata quinquennale e si concluderà alla fine del 1995. Il CRIS vi partecipa congiuntamente al Servizio Ambiente del CRTN ed al Laboratorio di Cosmogeofisica del C.N.R. di Torino (Anfossi et al. (1990)).

Entrambi i progetti prevedono un complesso di attività di ricerca nei bacini valdostani, con l'esecuzione di rilievi geofisici, osservazioni meteorologiche ed idrologiche in siti di alta quota, nonché rilevamenti, prelievi ed analisi chimiche su campioni di neve.

### **1.1 Progetto GHIACCIAI**

All'interno di una rosa di ghiacciai alpini di un certo interesse, anche dal punto di vista idroelettrico, sono stati selezionati i due apparati glaciali del Careser - La Mare (gruppo Cevedale) ed il sistema dei ghiacciai Lys e Indren (Monte Rosa), che sono stati ritenuti sufficientemente rappresentativi delle due tipologie fondamentali presenti nel-



Map design by R. Steinacker

Fig. 1 - Localizzazione dei punti di prelievo del Progetto ALPTRAC

l'insieme dei ghiacciai italiani, per lo svolgimento di indagini glaciologiche approfondite miranti all'acquisizione di informazioni idrologiche ed ambientali. Questi due complessi glaciali presentano inoltre la disponibilità di certo numero di rilievi idonei alla restituzione topografica e di osservazioni delle variazioni frontali e di serie storiche di grandezze meteorologiche ed idrologiche. Il programma di indagine prevede:

- Valutazione del bilancio di massa annuale mediante misure di superficie, le cui osservazioni vengono condotte dal Comitato Glaciologico Italiano;
- Acquisizione delle serie storiche di dati meteorologici, idrologici ed eventualmente proxy-data relativi ai bacini di pertinenza dei ghiacciai in esame;
- Rilievo aerofotogrammetrico dei ghiacciai e dei relativi bacini e restituzione cartografica digitale sia delle curve di livello alla scala 1:5000 che del D.T.M. (Modello Digitale del Terreno su griglia quadrata di m 50x50);
- Ricupero ed elaborazione dei rilievi stereofotogrammetrici precedenti, allo scopo di ottenere la successione cronologica di D.T.M. dei ghiacciai conformi al rilievo di partenza;
- Installazione e gestione di stazioni di misura di grandezze meteorologiche da localizzare al di sopra della linea di equilibrio del ghiacciaio;
- Rilievo dello spessore della massa glaciale mediante tecnica idonea alle caratteristiche fisiche dei ghiacciai temperati (ad esempio: sondaggio con microonde, geosismica ecc.);
- Installazione di stazioni idrometrografiche al punto di chiusura più prossimo alla fronte glaciale per la misura dei deflussi al fine di analizzare i differenti contributi derivanti da fusione nivale da quelli di fusione glaciale, anche attraverso opportune tecniche di indagine isotopica;

- Indagini collaterali sul glacialismo quaternario del bacino attraverso analisi stratigrafiche e profili pedologici e datazioni di reperti vegetali.

L'obiettivo finale è la messa a punto un modello tridimensionale in grado di descrivere, per un ghiacciaio tipico alpino, l'evoluzione della massa, della dinamica e della morfologia sotto l'azione di fattori forzanti connessi alla variabilità climatica, quali gli apporti, la capacità termica e le caratteristiche reologiche. Nell'ipotesi si riesca in futuro a realizzare l'esecuzione di una perforazione profonda della massa glaciale con recupero della carota di ghiaccio, dette informazioni risulterebbero necessarie per la datazione degli strati di ghiaccio.

## 1.2 Progetto ALPTRAC

I composti chimici veicolati dalle precipitazioni appartengono fondamentalmente a due categorie: i composti naturali (polveri di origine terrestre o cosmica, zolfo vulcanico o zolfo marino, ecc..) e composti di origine antropogenica, volgarmente definiti "inquinanti", come ad esempio i composti di zolfo e gli ossidi di azoto prodotti dalla combustione, l'ammonio di origine agricola, ecc...

Quando questi composti vengono veicolati dalle piogge, essi si trovano in soluzione e quindi sono coinvolti in una serie di reazioni chimiche e di interazioni, anche con i sistemi di raccolta, che rendono difficile l'interpretazione dei risultati dell'analisi evento per evento; al contrario i composti veicolati dalla neve non reagiscono in fase solida e quindi si possono conservare inalterati per lunghi periodi fino al laboratorio. Campionamenti di questo genere sono però poco rappresentati sotto il profilo della variabilità spaziale, sono limitati nel tempo (invernali o primaverili) e sono soggetti all'influenza del possibile rimaneggiamento del manto nevoso per effetto del vento.



Fig. 2 - Stazione meteorologica e sito di campionamento di Colle Vincent (vista verso il Balmenhorn).

Ciò premesso, le attività previste dal progetto ALPTRAC si articolano su quattro linee principali:

SNOSP (alpine wide SNOWpack Sampling Program), che consiste nel campionamento del manto nevoso su circa venti punti di misura, localizzati in ghiacciai alpini ad altitudini comprese tra i 3000 ed i 4000 metri, dislocati in Francia, Svizzera, Italia ed Austria, (Fig.1), con lo scopo di valutare l'ammontare e la distribuzione spaziale e temporale delle deposizioni nevose e dei composti chimici trasportati dalle correnti atmosferiche e depositati, nelle varie forme, in zone alpine remote. I siti italiani sono localizzati sul Colle Vincent (Monte Rosa, Alpi Occidentali) e sul Ghiacciaio Careser (Ortles-Cevedale, Alpi Centro-Orientali) e sono identificati nella Fig. 1 rispettivamente, con i numeri 8 e 16. Le caratteristiche geografiche di questi siti sono riportate in Tab. 1, mentre le date e le caratteristiche dei campionamenti sono riportate nella Tab. 2.

ALASS (ALpine Aerosol and Snow chemistry Study), che si prefigge lo scopo di studiare i principali processi che portano alla deposizione di aerosol, di acidi e di altri composti nel manto nevoso, analizzandone la dinamica evento per evento.

SNOWMET (SNOW METeorological support study) che ha l'obiettivo di fornire l'interpretazione meteorologica agli eventi di deposizione o trasporto segnalati dalle attività precedenti, e più in generale di studiare il trasporto di inquinanti a lunga distanza verso la catena alpina.

CORE (Chemical ice core on alpine cold glaciers) che ha lo scopo di acquisire informazioni sui trend dell'inquinamento nell'ultimo secolo, esaminando campioni di ghiaccio estratti dagli archivi glaciali.

A questo progetto il gruppo italiano ha contribuito partecipando alle attività SNOSP e SNOWMET, mentre si stanno cercando sinergie,

sia per l'esecuzione di una perforazione su un sito italiano, che per lo svolgimento di tutte le indagini sulla carota estratta. Il sito più promettente sotto questo profilo, è anche in questo caso, il ghiacciaio del Lys.

## **2.0 I ghiacciai della Valle di Gressoney**

Nella Valle di Gressoney insistono esclusivamente gli apparati glaciali del versante meridionale del Monte Rosa, le cui caratteristiche desunte dal Catasto compilato per il World Glacier Inventory e non ancora integralmente pubblicato sono riportate in Tab. 3.

## **3.0 Caratteristiche delle installazioni**

In tutte queste indagini resta di fondamentale importanza poter disporre di osservazioni meteorologiche in alta quota, per la cui esecuzione sono state sviluppate ed allestite delle idonee apparecchiature, caratterizzate da una specializzazione spinta per poter affrontare le condizioni richieste dall'esercizio in ambiente ostile. Esse sono riconducibili essenzialmente a due tipi:

- stazioni meteonivometriche;
- stazioni idrometrografiche.

Lo sviluppo e la realizzazione della strumentazione status-of-the-art per l'acquisizione di dati, dotata di elevata affidabilità di funzionamento in condizioni ambientali estreme e ridotta esigenza di manutenzione ha costituito parte integrante del progetto.

L'unità centrale di acquisizione dati è basata su un data-logger Campbell CR10, dotato di 64 kRAM totali di memoria, in grado di



Colle Vincent station

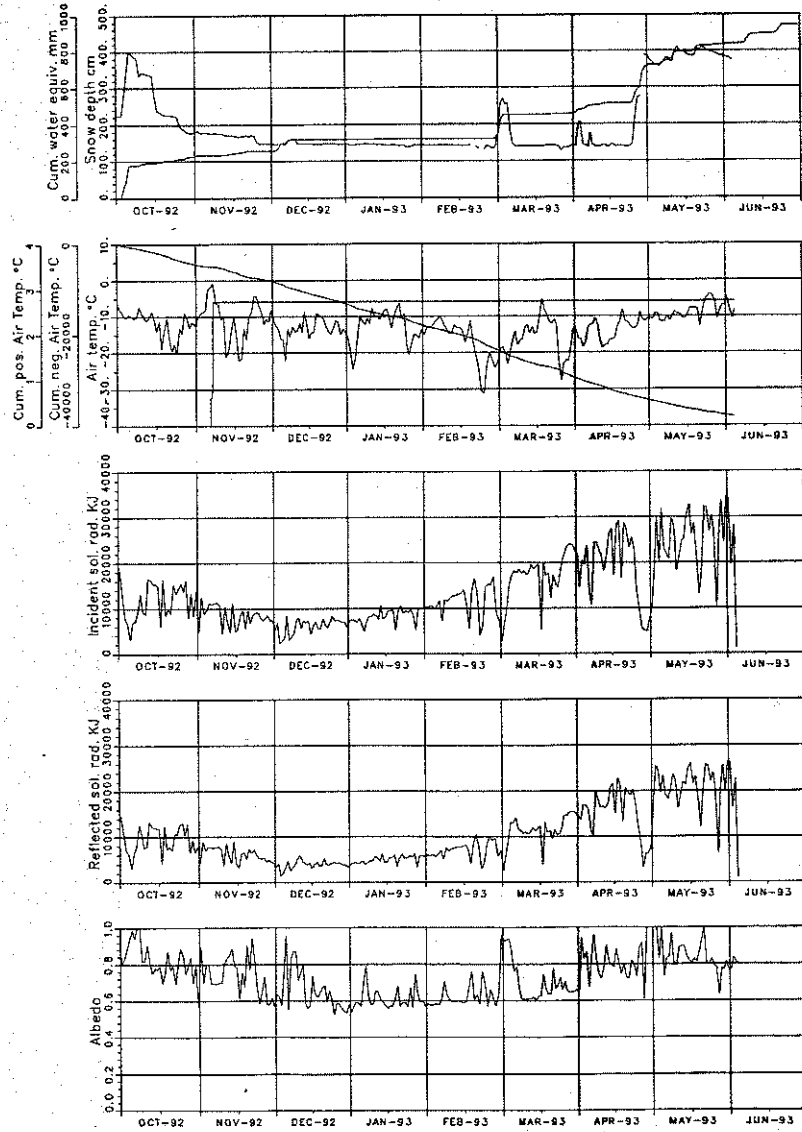


Fig. 3a - Grafici dei dati raccolti dalla stazione meteorivometrica di Colle Vincent (AO) nel periodo ottobre 92 - giugno 93

gestire l'acquisizione di 12 sensori ad uscita analogica e di altri 2 ad uscita digitale, e di una memoria di lavoro aggiuntiva per l'esecuzione di eventuali elaborazioni in linea.

I dati acquisiti vengono memorizzati nella memoria RAM, dalla quale vengono scaricati in occasione dei sopralluoghi, utilizzando una interfaccia RS-232. E' possibile comunque prevedere anche la trasmissione dei dati via modem attraverso un telefono cellulare E-TACS, mediante il quale può essere effettuato il collegamento in qualsiasi punto della rete telefonica nazionale.

L'alimentazione energetica è fornita mediante pannelli solari costituiti da due elementi di 0.1 m<sup>2</sup>, che permettono una potenza massima di ricarica 16 W. Essi vengono posti verticalmente, per ridurre al minimo la deposizione della neve.

Il range della temperatura di funzionamento del data-logger, per la versione standard è compreso tra -25°C e +50°C, mentre per la versione adatta alle condizioni estreme è compreso tra -55°C e +85°C. Si vede quindi che anche la versione standard permette di operare alle basse temperature che si incontrano nelle normali condizioni di operatività degli ambienti glaciali alpini, tenendo presente che durante il periodo freddo, in genere l'apparecchiatura resta sepolta sotto la neve. A questo scopo, oltre alla esecuzione stagna del data-logger, viene previsto un contenitore stagno che contiene l'interfaccia e le batterie, all'interno del quale viene registrata la temperatura. Durante il periodo di esercizio della stazione Colle Vincent, la temperatura minima registrata all'interno del data-logger è stata -6°C, mentre la temperatura minima della neve, a +0.20 m dal suolo ha raggiunto anche -14°C e la temperatura esterna è scesa sotto i -30°C.

Nel caso di stazioni meteonivometriche i sensori (elencati in Tab. 4) vengono fissati ad una crociera che sormonta un palo in vetroresina di colore bianco, mentre il sistema di acquisizione dati e le batterie di alimentazione vengono inseriti in un contenitore stagno che viene al-

loggiato all'interno della parte cava della base del palo. In Fig. 2 è riportata la foto dell'installazione realizzata al Colle Vincent.

Il palo viene fissato su una crociera metallica mediante un giunto a cerniera che ne permette l'abbattimento in occasione delle operazioni di controllo e manutenzione dei sensori. La crociera realizza un piano di appoggio per mezzo di pannelli di legno trattato.

La stazione è strutturata in modo tale da venire montata in fondo valle, alla base delle operazioni, e trasportata con elicottero sul sito di installazione.

Nel caso delle stazioni idrometriche, le cui caratteristiche dei siti di installazione sono riportate in Tab. 2, i sensori di misura sono essenzialmente uno (o più) trasduttori di pressione, opportunamente protetti contro le sovrappressioni causate dall'eventuale intrappolamento nel ghiaccio, ed un sensore di temperatura. L'installazione prevede inoltre la realizzazione di una sezione di canale idonea per la misura idrometrica, possibilmente anche una passerella per le misure di portata, l'alloggiamento della strumentazione ed il sostegno per i pannelli solari. Poiché in queste condizioni è difficile poter realizzare dei canali con sezione regolare e stabile, è opportuno prevedere che i sensori per la misura dell'altezza idrometrica e della temperatura dell'acqua vadano installati in un pozzetto di calma.

Accanto a questi sensori è possibile prevedere anche l'installazione di sensori per la misura di parametri della qualità dell'acqua, quali conducibilità, pH, ecc.

L'unità di acquisizione è analoga a quella delle stazioni meteorivometriche; l'alloggiamento del data-logger viene realizzato mediante una cassetta stagna contenente anche l'alimentazione.

#### 4.0 Risultati del progetto GHIACCIAI

Allo stato attuale il progetto Ghiacciai sul settore valdostano è ancora nella fase preliminare, però si può prevedere una sensibile accelerazione nell'acquisizione dei risultati scientifici potendo contare sull'esperienza e sulle installazioni già realizzate negli anni precedenti nel corso della realizzazione del Progetto ALPTRAC.

##### 4.1 - Osservazioni meteorologiche ed idrologiche

A testimonianza dell'ottimo funzionamento della stazione di Colle Vincent e da quella localizzata presso la Diga Gabiet viene riportato il grafico di funzionamento di tutti i sensori di un periodo particolarmente rappresentativo, soprattutto per le deposizioni. In particolare le Figg. 3a e 3b contengono i grafici delle grandezze meteorologiche registrate nel periodo invernale 1992-93. Il primo grafico registra l'evoluzione del manto nevoso, dal quale si evidenziano notevoli episodi di erosione (fino a 2 metri), e solo dalla fine di aprile del 1993 lo stabilizzarsi delle deposizioni. L'altra curva riporta il totale di precipitazioni cumulate (mm acqua) misurate al Gabiet.

Il secondo grafico riporta la curva della temperatura dell'aria (curva modulata) e le due curve che rappresentano rispettivamente la somma delle temperature positive (tratto orizzontale) e di quelle negative (curva discendente). La temperatura minima registrata è stata  $-31^{\circ}\text{C}$  nella seconda metà di febbraio.

Il terzo, il quarto ed il quinto grafico riportano rispettivamente i flussi di radiazione solare incidente e riflessa ed i valori dell'albedo, grandezza che è data dal rapporto radiazione riflessa/radiazione incidente. Si verifica che nel periodo considerato il valore di questo rapporto resta compreso tra 0.6 (valore tipico del ghiaccio vivo, rimasto scoperto

per effetto dell'erosione) e 0.8, con punte di valori prossimi a 1 (cioè viene riflessa una frazione compresa tra il 60% e l'80% della radiazione solare incidente per effetto dell'elevato potere riflettente della neve fresca).

I primi due grafici della Fig. 3b riportano la velocità del vento (valore medio su 2 minuti) e la direzione del vento. Sono stati misurati ripetutamente episodi con velocità fino a circa 25 m/s (90 km/h), che sono risultati responsabili delle erosioni del manto nevoso, e con vento proveniente prevalentemente da N-NW anche per effetto della canalizzazione del vallone compreso tra la Piramide Vincent ed il Balmenhorn.

Particolare interesse presenta l'ultimo grafico, sempre della Fig. 3b, che riporta nel primo tratto la temperatura della neve misurata da una sonda a -20 cm sotto la stazione, grandezza che risente fortemente dell'influenza della temperatura dell'aria, mentre il secondo tratto riporta la temperatura della stessa sonda posizionata a -10. m di profondità; in questo caso il sensore registra stabilmente una temperatura di circa -4°C.

Alla luce dei risultati, il funzionamento complessivo del sistema di acquisizione e dei sensori delle stazioni si può considerare molto positivo, in considerazione anche delle condizioni estreme nelle quali queste apparecchiature operano. Un grave inconveniente si è verificato nei primi mesi del 1994 con il cedimento della struttura in vetroresina del palo, che è precipitato al suolo e successivamente è stato sepolto sotto una spessa coltre di neve e non più ritrovato. Questo incidente ha stimolato la progettazione di una nuova stazione con sostegno in metallo a struttura tralicciata e con ulteriori innovazioni, apparecchiatura che è in fase di realizzazione e verrà installata appena possibile.

Già dal 1993 è stata installata una stazione idrometrica sull'opera di presa idraulica che raccoglie le acque dell'emissario del ghiacciaio Indren, il Rio Moos in località Z'Indren. La registrazione dei livelli e la taratura della scala di deflusso consente di determinare i volumi

defluiti contribuendo, oltre alla valutazione del bilancio di massa ed idrologico del ghiacciaio anche ad una migliore conoscenza della risposta di quel particolare bacino nivo-glaciale ad eventi meteorici eccezionali, come quello registrato nel settembre 1993. (Fig. 4). Una iniziativa analoga è in corso anche per il ghiacciaio del Lys con la costruzione di una stazione di misura sul torrente Lys in corrispondenza della forra di Alpe Courtlys, i cui risultati consentiranno una più accurata chiusura del bilancio idrologico complessivo.

#### **4.2 - Bilancio di massa e variazioni superficiali e volumetriche**

La valutazione del bilancio di massa mediante misure dirette di superficie di norma viene condotta utilizzando una rete di paline ablatometriche infisse sul ghiaccio in posizione adeguatamente rappresentativa delle condizioni dell'area circostante, per ciascuna delle quali sia nota la quota. Le misure riguardano le variazioni cumulate della lunghezza sporgente dal manto nevoso o dal ghiaccio delle paline, le quali vengono adeguatamente riposizionate quando il livello di riferimento si approssima ad una delle due estremità.

Alla fine dell'anno idrologico, che si estende convenzionalmente dal 1 ottobre al 30 settembre dell'anno successivo, per ciascuna palina viene valutato il bilancio idrico netto, che può risultare o di accumulo netto, nel caso di un residuo di neve sulla superficie di riferimento del ghiacciaio dell'inizio dell'anno idrologico, o di ablazione netta, nel caso che l'effetto dei processi di fusione di materiali diversi (neve, nevato, ghiaccio) abbia intaccato anche la superficie di riferimento.

Sotto l'ipotesi, generalmente confermata, di una relazione lineare tra l'equivalente in acqua dei termini di accumulo o di ablazione con la quota, viene ricostruita la distribuzione altimetrica del bilancio specifico netto (mm W.E.) per fasce altimetriche equispaziate (di ampiezza 50 o 100 m).

La quota per la quale il bilancio risulta in equilibrio, nota come ELA (Equilibrium Line Altitude) costituisce un importante indicatore climatico in relazione diretta con il bilancio totale di massa annuale del ghiacciaio. In particolare per il ghiacciaio del Lys il valore di ELA oscilla attorno ai 3400-3500 m.

Per calcolare il bilancio di massa complessivo (corrispondente alla variazione volumetrica del ghiacciaio ( $m^3$ ) tenuto conto di una resa in acqua del ghiaccio di 0.9) basta ragguagliare il valore di bilancio specifico relativo a ciascuna fascia altimetrica per la corrispondente superficie ottenuta dalla curva ipsometrica e sommare algebricamente i termini di ogni strato.

La complessità del sistema glaciale del Lys-Indren impone che l'indagine sul bilancio di massa, oltre che quantificare l'ablazione superficiale, tenga conto anche dei flussi di massa derivanti dallo scorrimento glaciale, in particolare dell'area di accumulo, poiché nell'economia delle variazioni volumetriche complessive della massa questi termini pesano in maniera sensibile.

Per far questo si è reso necessario l'allestimento di un inquadramento geodetico dell'area di investigazione, che è stata condotta facendo uso della tecnica GPS (Sistema di Posizionamento Satellitare) e di una cartografia di dettaglio, in scala almeno 1:5000 che si potrà ottenere dalla restituzione del rilievo aerofotogrammetrico condotto in collaborazione con il Comitato Glaciologico Italiano nell'autunno del 1994.

La distribuzione spaziale della velocità superficiale (tridimensionale) nell'area di accumulo del ghiacciaio viene determinato misurando, ad intervalli di tempo successivi, gli spostamenti subiti dai punti di riferimento, che sono rappresentati dalle stesse paline del bilancio di massa. Nell'area del bacino ablatore, soprattutto dove la lingua è sviluppata e canalizzata, e dove peraltro l'influenza della velocità è meno importante, è previsto invece l'impiego del metodo classico, cioè della

valutazione della distribuzione delle velocità superficiali attraverso la misura dello spostamento di un allineamento di massi posti sulla superficie glaciale.

La prima stima quantitativa è stata ottenuta nell'anno idrologico 1993-94, attraverso notevoli processi di approssimazione; questa valutazione, ricavata da osservazioni preliminari, richiede però una conferma con ulteriori osservazioni future, soprattutto quando saranno disponibili le misure idrometriche della stazione di Courtlys. Questo dato qualitativo comporta un evidente saldo negativo, diretta conseguenza delle eccezionalmente sfavorevoli condizioni di scarsità di accumulo e di temperature estive sostenute, che hanno causato una esposizione precoce del ghiaccio vivo. Si ritiene in futuro di poter aumentare il numero dei punti di controllo e di poter determinare la distribuzione delle velocità superficiali.

#### **4.3 - Rilievi geofisici**

Lo scopo dei rilievi geofisici è quello di provvedere ad una descrizione della topografia del fondo allo scopo di determinare pendenze ed orientamento del letto roccioso e spessori della massa glaciale, che sono parametri indispensabili per la descrizione della dinamica dei ghiacciai.

Le tecniche usate per la prospezione geofisica dei ghiacci, in grado di dare risultati quantitativi, sono essenzialmente quelle che sfruttano la riflessione delle emissioni di onde radar oppure di onde sonore (geosismica) del letto roccioso e la determinazione dei relativi tempi di arrivo degli echi. Entrambe queste tecniche presentano diverse difficoltà di esecuzione nel caso di ghiacciai temperati, ragioni per cui dovrebbero essere utilizzate in maniera complementare, eventualmente associando anche rilievi di anomalie del campo della gravità.



Colle Vincent station

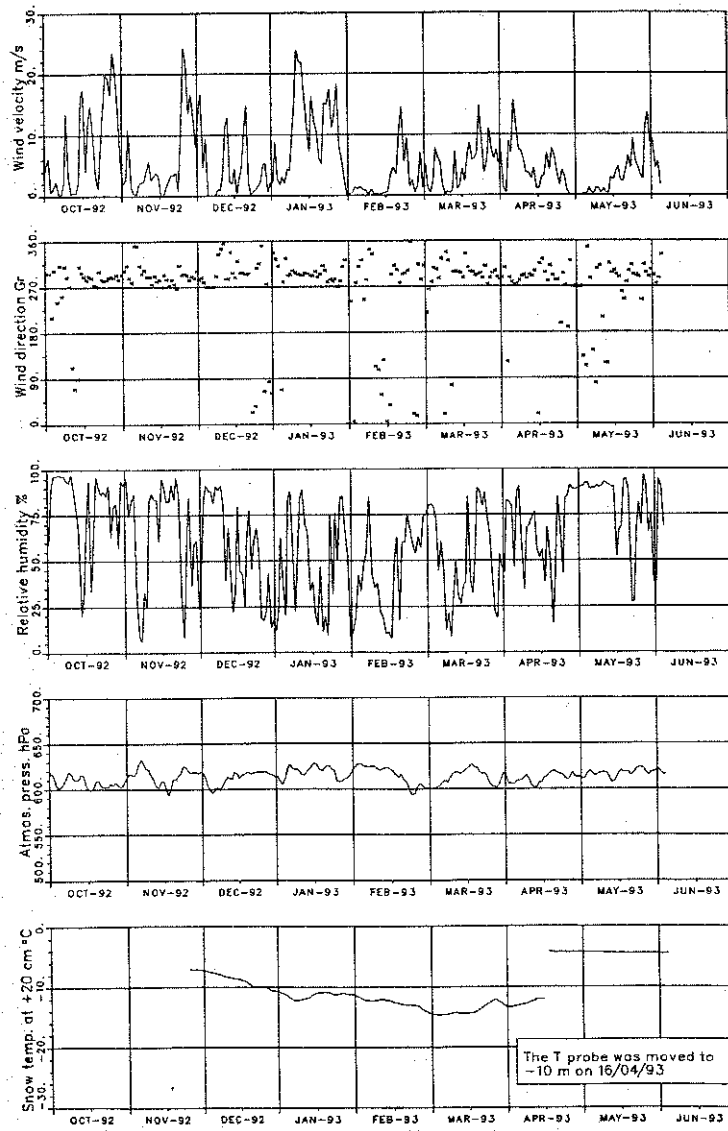


Fig. 3b - Grafici dei dati raccolti dalla stazione meteorologica di Colle Vincent (AO) nel periodo ottobre 92 - giugno 93

Per prima cosa si provvederà all'esecuzione del rilievo radar sul ghiacciaio del Lys, che presenta notevoli difficoltà di accesso e di percorrenza nella parte seraccata, il superamento di pendenze notevoli, ecc., e che è stato programmato con l'impiego di una apparecchiatura applicata alla sospensione baricentrica di un elicottero, la cui posizione verrà georeferenziata mediante uno strumento di navigazione GPS con correzione differenziale.

I risultati della prospezione, essenzialmente le isolinee della topografia del fondo potranno venire acquisite in formato digitale ed associate alla restituzione cartografica per le elaborazioni volumetriche.

### 5.0 Risultati del progetto ALPTRAC

In via preliminare vi è da segnalare la forte dipendenza dell'attendibilità dei risultati scientifici dalla messa a punto di adeguate metodologie di prelievo, trattamento ed analisi di campioni di neve stagionale che evitino ogni possibile contaminazione dei campioni. Le procedure sono state adeguatamente testate mediante intercalibrazione con gli altri laboratori aderenti allo stesso Progetto, ed in conformità a tali procedure tutti gli strumenti ed apparecchiature sono stati precedentemente decontaminati in laboratorio e conservati protetti fino al momento dell'uso (Fig. 5).

Il campionamento integrale del manto nevoso viene di norma effettuato alla fine del periodo di accumulo e prima che la temperatura dell'aria raggiunga, anche episodicamente, valori al di sopra della temperatura di fusione; le modalità prevedono la preparazione di una trincea orientata con il lato più lungo secondo l'asse E-W, che deve raggiungere il livello dello strato autunnale precedente. Tutte le operazioni, dall'analisi stratigrafica della neve (condotta secondo la procedura AINEVA (Cagnati, 1989)) al campionamento vero e proprio e la

misura delle densità degli strati devono essere condotte sulla parete in ombra della buca, che deve essere opportunamente preparata, evitando il contatto della massa nevosa con oggetti diversi da quelli preparati appositamente per il campionamento.

Il prelievo viene effettuato, strato per strato, mediante un campionatore a forma di cassetta rettangolare in acciaio inossidabile e con bordi taglienti. I campioni, sigillati in sacchetti di plastica, vengono riposti direttamente sul sito di campionamento in un freezer preraffreddato, con il quale vengono trasportati poi fino al laboratorio di analisi, nel quale possono essere conservati anche per un lungo periodo in camera fredda. Contemporaneamente presso la diga del Gabiet venivano raccolti mediante un campionatore di sola pioggia (wet-only) i campioni delle singole nevicate, evento per evento, e conservati in frigorifero.

Le metodologie analitiche impiegate per ciascuna specie ionica prevedono l'uso di apparecchiature chimico-fisiche automatiche, e consentono elevatissime sensibilità (qualche ppb).

In questo modo si ottengono le concentrazioni di sostanze contenute in ciascun strato unitario del manto nevoso (5 o 10 cm di spessore a seconda dell'altezza del manto), che può venire associato, attraverso l'interpretazione di informazioni diverse (composizione chimica, stratigrafia della neve, registrazione dei dati meteorologici) con altri strati per identificare l'evento di deposizione cui questa pila di strati appartiene. Una volta nota la data della deposizione, attraverso una simulazione matematica a ritroso di un modello di circolazione atmosferica, potrà essere identificata la traiettoria percorsa dalle masse d'aria che hanno veicolato, nel periodo precedente, quella deposizione.

Il prodotto della concentrazione per il contenuto in acqua di ciascuno strato (calcolato attraverso la densità) dà il carico ionico dello strato, che può essere combinato in vari modi con gli altri per interpretare le caratteristiche del sito rispetto alle deposizioni inquinanti.

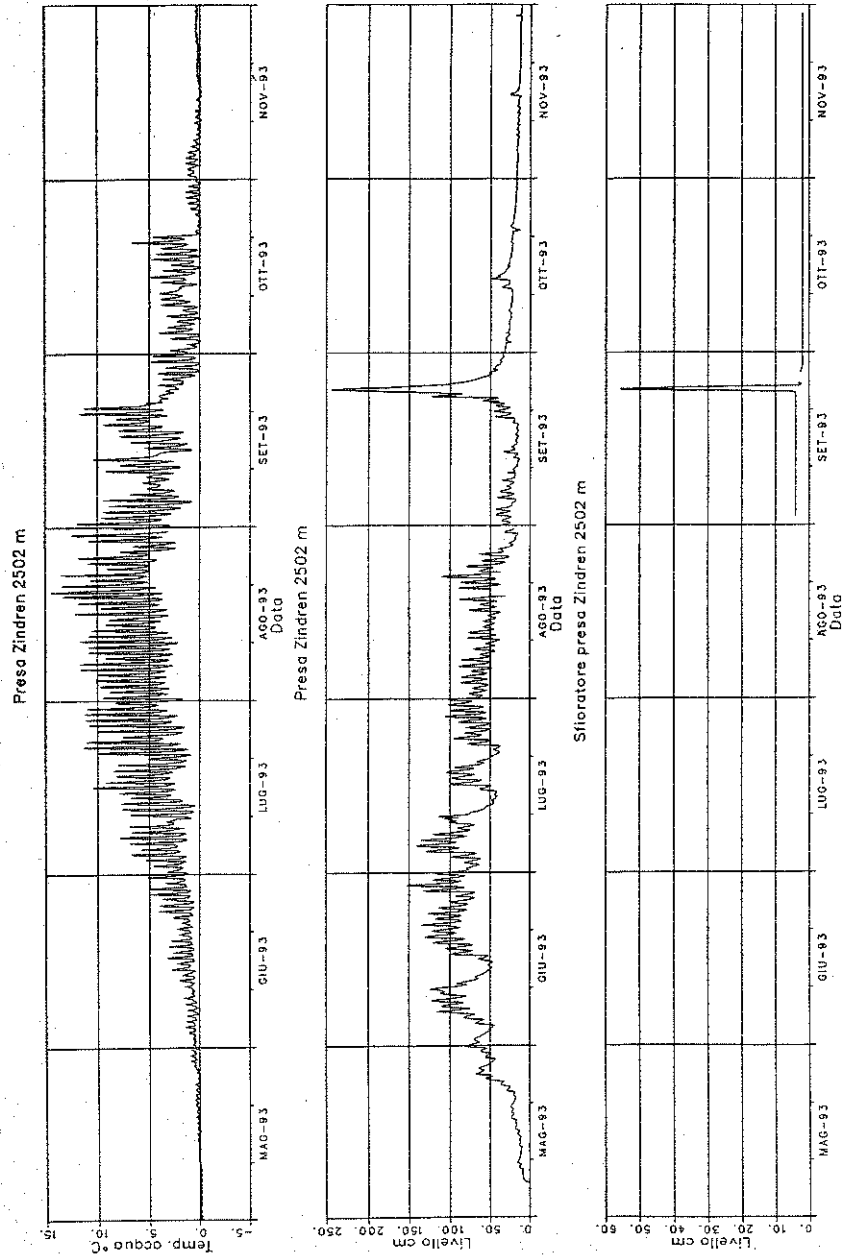


Fig. 4 - Registrazione della temperatura dell'acqua e del livello idrometrico alla presa ed allo sfioratore sul Rio Moos a Z'Indren nel 1993

### **5.1 Interpretazione dei valori delle deposizioni totali**

La somma dei carichi di ciascuna specie ionica di tutti gli strati dà il valore delle deposizioni totali; per quanto riguarda l'interpretazione dei dati ottenuti dai campionamenti di Colle Vincent bisogna tenere presente che le deposizioni in grado di accumulare sono prevalentemente quelle che hanno luogo nel periodo aprile-maggio, al contrario di quelle invernali o primaverili che sono invece più scarse e caratterizzate da scarsa resistenza all'erosione.

Le analisi sulle deposizioni nevose di Colle Vincent, che si riferiscono ai campionamenti condotti nel periodo 1992-94 (Tab. 5), evidenziano forti differenze interannuali a causa di eventi di deposizione particolarmente concentrate. I rapporti delle concentrazioni nitrati/solfati misurate sui campioni di Colle Vincent sono inferiori a quello della media dei rapporti osservati sugli altri siti della regione Monte Rosa-Jungfrauoch, che sta ad indicare una più ridotta incidenza delle sorgenti antropiche.

### **5.2 Stima delle caratteristiche di fondo delle deposizioni**

Attraverso una opportuna scelta di eventi di precipitazioni nevose la cui composizione non risulti influenzata da contributo di inquinanti, si possono ottenere informazioni circa i valori di concentrazione ionica che possono essere considerati rappresentativi di eventi non perturbati da fenomeni di trasporto a lunga distanza (come nel caso di deposizioni di polveri sahariane) o di trasporto a breve distanza da sorgenti di inquinamento distribuite o localizzate in siti a più bassa elevazione.

Tali valori non sono propriamente i valori di fondo in senso stretto, ma possono essere considerati rappresentativi delle condizioni medie della libera troposfera.

Sono state analizzate le distribuzioni di frequenza cumulata del carico ionico totale e dei carichi delle singole specie ioniche indicatrici dell'inquinamento antropogenico, e, per ogni deposizione annuale sono stati calcolati i valori di carica ionica totale (escludendo  $H^+$  e  $HCO_3^-$ ), la composizione dei campioni è stata organizzata per valore crescente, e sono stati presi in considerazione i campioni compresi nella fascia 5% - 35% di questa successione, calcolando la concentrazione media pesata delle varie specie ioniche. E' stato verificato come questo valore medio pesato delle concentrazioni dei campioni compresi nella fascia 5%-35% delle deposizioni totali possa essere considerato una stima (per eccesso) del valore della concentrazione di fondo.

L'analisi della tendenza dei valori di concentrazione di fondo di  $SO_4$ ,  $NO_3$  ed acidità misurati sui tre anni disponibili nelle deposizioni di Colle Vincent, pur nella limitatezza del campione disponibile, mostrano un trend decrescente, conclusione che meriterebbe di essere confermata con ulteriori campionamenti.

Il valore medio del carico ionico calcolato su tutti i campioni di fondo è di circa  $10 \mu Eq l^{-1}$ , dei quali circa  $2 \mu Eq l^{-1}$  provengono dall'acidità,  $2.3 \mu Eq l^{-1}$  (143 ppb) di  $NO_3$  e  $1.4 \mu Eq l^{-1}$  (141 ppb) di  $SO_4$ , questi ultimi risultando in ottimo accordo con quelli riportati in letteratura (Wagenbach et al. (1994), Maupetit et al. (1994)) per lo stesso periodo nei tre siti ALPTRAC contigui.

### 5.3 Valutazione delle deposizioni di eventi particolari

Gli eventi particolari possono essere classificati come: naturali e di natura antropogenica. I primi, che in genere sono dovuti al trasporto di polveri terrigene provenienti dalle regioni sahariane, presentano come carattere distintivo elevate concentrazioni di elementi alcalino-terrosi, mentre i secondi, che vengono originati in

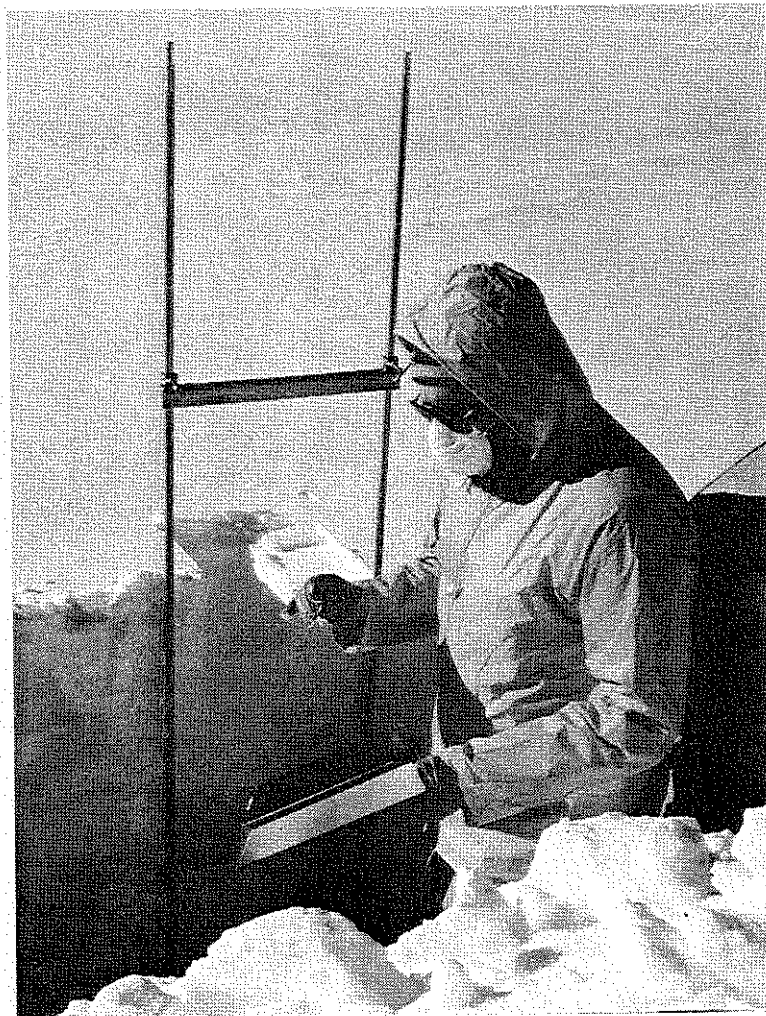


Fig. 5 - Campionamento della neve secondo la procedura ALPTRAC

aree ad alta concentrazione industriale, sono caratterizzati da un arricchimento di  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  e  $\text{NH}_4$ .

La cronologia comparata delle segnalazioni di questi eventi, che peraltro non sono frequenti, è riportata nella Tab. 7. Come si vede, per quanto riguarda siti italiani, è registrato in entrambi un evento nel marzo 1991, evento che è stato osservato peraltro anche in tutti gli altri siti alpini, nell'aprile 1993 è stato rilevato un episodio solo a Colle Vincent, mentre nel 1994 si è avuta segnalazione di deposizioni in entrambi i siti, ma in date differenti.

Nella Tab. 8. sono riportati i carichi ionici delle deposizioni, i valori medi ponderati e i contributi specifici delle deposizioni sahariane rispetto alla deposizione totale, per tutti gli eventi analizzati.

Particolarmente significativo è l'episodio osservato a Colle Vincent nella campagna del 1993: lo strato di deposizione sahariana si trovava ad una altezza di 135 cm dal fondo ed aveva uno spessore di 10 cm, come riportato dal grafico di Fig. 6. Il carico ionico trasportato dalla deposizione rappresenta una frazione dominante di quello contenuto nell'intero spessore del manto nevoso (circa il 70%), mentre l'alcalinità rappresenta circa l'80% dell'alcalinità totale. La composizione di questa deposizione è in buon accordo con il carico ionico delle precipitazioni raccolte con il campionatore wet-only della diga Gabiet il 27/4/93.

Un campione dei residui insolubili provenienti da questa deposizione è stato analizzato per mezzo di un microscopio ottico a diffrazione, ottenendo i seguenti risultati:

quarzo citrino (responsabile della colorazione giallo-pallido)	90%
Feldspati ( $\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{CaO}$ , $\text{K}_2\text{O}$ $n\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2$ ), Kaolinite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e Diorite	10%

La composizione di questo campione è stata confrontata con quella di un campione di aerosol di sabbia sahariana (dimensione media dei granuli <0.1 micron) proveniente dal deserto tunisino, la cui composizione era: quarzo 30-35%,  $\text{CaCO}_3$  15-20% ed il resto costituito da vari tipi di Feldspati.



Si può quindi ragionevolmente supporre che, nel caso della deposizione di Colle Vincent, il  $\text{CaCO}_3$  e la maggior parte dei Feldspati, che sono più abbondanti nella composizione delle polveri originarie, possano essere stati solubilizzati nel corso della traiettoria spiegando così la forte concentrazione di Ca e di altri elementi alcalino-terrosi che caratterizzano la composizione delle precipitazioni che veicolano le polveri sahariane.

Per quanto riguarda invece l'episodio registrato nel 1994, la deposizione si presentava superficiale e parzialmente erosa dal vento, con le caratteristiche di una deposizione secca. Il confronto tra la composizione dei due strati più elevati e quella del campione di neve superficiale contenente la polvere, escludendo la possibilità che la deposizione secca possa aver diffuso attraverso uno spessore di 20 cm di neve, dimostra come la deposizione secca sia stata preceduta da una deposizione umida di polvere sahariana arricchita di composti antropogenici quali  $\text{NH}_4$  e  $\text{NO}_3$ .

Una stima della composizione della polvere sahariana può essere compiuta sottraendo dalla carica ionica totale del campione (polvere+neve) la carica ionica corrispondente alla massa della sola neve, nell'ipotesi che il soluto abbia la stessa composizione e concentrazione di quello contenuto nel primo strato (Tab. 9).

In questo caso l'apporto di alcalinità è stato particolarmente elevato e tale da far assumere carattere alcalino alla deposizione totale, che altrimenti sarebbe stata acida.

Per quanto riguarda gli episodi di deposizioni di origine antropica, dai diagrammi del carico ionico dei campioni prelevati a Colle Vincent negli anni 1992, 1993 e 1994 si può osservare che nel 1992 gli eventi di deposizione, avvenuti tra la seconda metà di novembre 1991 e l'8 giugno 1992, presentano una concentrazione di inquinanti molto contenuta, senza grosse variazioni, pur evidenziandosi le tracce caratteristiche di singoli eventi di deposizione. Questi sono riconoscibili in quanto

le prime fasi della precipitazione tendono a rimuovere una maggiore quantità di gas e particelle, e quindi gli strati inferiori sono più concentrati rispetto a quelli successivi.

Il prelievo del giugno 1993 di Colle Vincent, rappresentato sempre nell'istogramma di Fig. 7, è caratterizzato anche da uno strato di 20 cm di neve leggermente sporca, seguiti da circa 1 metro di neve aventi caratteristiche simili a quelle già viste per la parte pulita dei campioni 1993. Successivamente il carico ionico rimane sempre elevato, ad iniziare da una deposizione con caratteristiche sahariane, alla quale ne fa seguito una con caratteristiche antropiche (forte presenza di  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  ed acidità), proseguendo poi con campioni anch'essi caratterizzati da apporti di ioni di origine antropica, anche se in concentrazioni leggermente inferiori.

Nei campioni raccolti nel giugno 1994, sempre a Colle Vincent si conserva invece la traccia di un evento autunnale, avvenuto in novembre ma non segnalato in fase di campionamento, ricco in inquinanti, al quale fanno seguito, tra la quota 60 cm e la quota 240 cm (misurare dal fondo della buca), una successione di strati aventi una prima parte molto diluita ed una seconda leggermente più concentrata. Dalla quota 240 cm fino alla superficie è evidente un fenomeno di deposizione alquanto marcato.

A causa delle differenti condizioni meteorologiche cui si riferiscono i campioni esaminati nei tre anni, i valori delle concentrazioni medie ponderate (in  $\mu\text{Eq l}^{-1}$ ) differiscono di anno in anno, come risulta dalla Tab. 6.

## 6.0 Conclusioni

I campionamenti di neve effettuati in alta quota in siti remoti si prestano ad una valutazione delle caratteristiche chimiche della qualità

dell'aria nella libera troposfera, anche se, per motivi di tipo geografico e logistico, non è stato possibile pervenire ad una caratterizzazione continua, limitando le osservazioni al periodo invernale-primaverile.

La variabilità annuale si è rivelata piuttosto elevata, in quanto sporadici eventi di trasporto da medio-lunga distanza sono in grado di alterare profondamente il valore medio delle deposizioni. Tuttavia è possibile identificare questi eventi e detrarre il loro contributo dalla deposizione totale, così da poter effettuare una valutazione delle caratteristiche chimiche che più si avvicinano a quelle di fondo.

Gli episodi a maggiore contributo antropico sono caratterizzati da un più basso rapporto tra la concentrazione di ione nitrato rispetto a quella dello ione solfato. Frequentemente la loro acidità è neutralizzata dalla presenza di elementi alcalino-terrosi. I campioni caratterizzati da un basso contenuto ionico sono sempre acidi per acidità forte (non dovuta cioè allo ione bicarbonato); questa acidità risulta però contenuta e non sembra avere alcuna rilevanza ai fini ambientali, pur rappresentando un segnale di acidificazione dell'atmosfera.

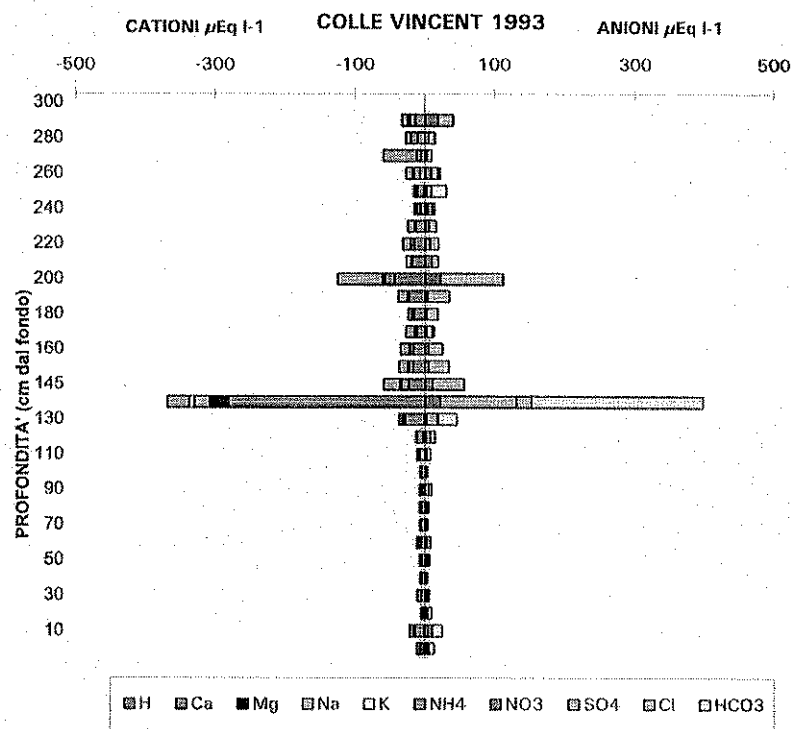


Fig. 6 - Bilancio ionico delle deposizioni campionate a Colle Vincent nel giugno 1993

## BIBLIOGRAFIA

- Anfossi D., Novo A., Rossi G. C., Villone B. (1990): Misure meteorologiche e di deposizione umida di inquinanti in siti alpini di alta quota: metodologie e prospettive. - Workshop su "Effetti degli inquinanti atmosferici e del clima sugli ambienti naturali e sui manufatti" Bressanone oct. 1990.
- Anfossi D., Novo A., Rossi G.C., Villone B. (1990) A contribution to the EUROTRAC subproject ALPTRAC - Campagna 1989. *EUROTRAC Annual Report 1989 Part 3* - Garmisch-Partenkirchen June 1990.
- Cagnati, A. (1984) I servizi valanghe regionali e provinciali dell'arco alpino italiano. *Neve e Valanghe* 0, 7-17.
- Eureka Environmental Project. Eurotrac Subproject High Alpine Aerosol and Snow Chemistry Study. ALPTRAC Proposal prepared by the ALPTRAC steering group, Febr. 1989.
- Maupetit F., Delmas R.J., Novo A., Rossi G. C., et al. (1992): Nitrate and sulphate in alpine glacier snow: preliminary results from 1991 SNOSP campaign. ALPTRAC Meeting Garmisch-Partenkirchen March 1992.
- Maupetit F., Wagenbach D., Weddeling P., Delmas R.J. (1994) Recent chemical and isotopic properties of high altitude cold alpine glaciers. *Atmos. Environ.* (in stampa)
- Nickus U., Kuhn M., Pichlmayer F., Baltensperger U., Delmas R., Gäggeler H.W., Kasper A., Kromp-Kolb H., Maupetit F., Novo A., Preunkert S., Puxbaum H., Rossi G.C., Schöner W., Schwikowski M., Seibert P., Staudinger M., Trockner V., Wagenbach D. (1995) SNOSP: Ion deposition and concentration in high-alpine snowpacks. *Tellus* in press.
- Rossi G. C., Tomasino M. (1991): Impiego dei Sistemi Informativi Territoriali (S.I.T.) nella valutazione della producibilità idroelettrica del manto nevoso e della sensibilità climatica dei bacini nivo-glaciali. VI Convegno Italiano di Glaciologia - Gressoney.
- Rossi G. C. (1992): Climate change impact on an alpine nivoglacial basin: effects on hydropower management. M.I.T. Symposium on "The world at risk: Natural hazards and Climate Change" Cambridge-Mass. (U.S.A.) Jan. 1992
- Wagenbach D., Preunkert S., Schajor R. (1994) Retrospective and present state of the anthropogenic aerosol deposition at a high altitude alpine glacier (Colle Gnifetti 4450 m a.s.l.) *EUROTRAC Annual Report*, Int. Sci. Secr. Garmisch-Partenkirchen July 1994, pp 54-62.

Località	Sestriere	Colle Vincent	Passo Adamè	Careser
Comune	Sauze di Cesana	Gressoney La Tr.	Saviore dell'Ad.	Rabbi
Provincia	Torino	Aosta	Brescia	Trento
Bacino Idrografico	Po- Dora Riparia	Po- Dora Baltea	Po-Sarca	Adige- Noce
Gruppo Orograf.	Roc de Boucher	Monte Rosa	Adamello	Ortles-Cevedale
Ghiacciaio	—	Lys Orient.	Mandrone	Ved. Careser
Tavoletta I.G.M.	66 I SE	29 I SE	20 III NE	9 II NO
	Colle di Thuras	Alagna Valsesia	Monte Adamello	Cima Sernai
Latitudine	44° 54' 31" N	45° 54' 37" N	46° 08' 53" N	46° 27' 16" N
Longitudine	06° 53' 05" E	07° 51' 40" E	10° 31' 51" E	10° 43' 07" E
Quota m s.l.m.m.	2750	4086	3128	3090
Orientazione del sito	Nord	Sud-Ovest	Nord	Sud
Funzionamento	1990-91	01.11.1991	1.10.1992	29.11.1989

Tab. 1 - Caratteristiche dei siti delle installazioni meteorometriche ENEL

Località	Alpe Cortlys	Presa Gabiet	La Joux	Ponte di Pietra	Careser Baia
Corso d'acqua	Lys	Rio Indren	Ruitor	Noce Bianco	Rio Careser
Comune	Gressoney L.T.	Gressoney L.T.	La Thuile	Pejo	Pejo
Provincia	Aosta	Aosta	Aosta	Trento	Trento
Bacino Idrografico	Po- Dora Baltea	Po- Dora Baltea	Po- Dora Baltea	Adige- Noce	Adige- Noce
Gruppo Orograf.	Monte Rosa	Monte Rosa	Ruitor	Ortles-Cevedale	Ortles-Cevedale
Ghiacciaio	Lys-Felik	Indren-Gastelet	Ruitor	La Mare	Vedr. Careser
Tavoletta I.G.M.	29 I SO	29 I SE	28 III SO	9 III NE	9 II NO
	S. Jacques	Alagna Valsesia	La Salle	Monte Cevedale	Cima Sternai
Latitudine	45° 52' 42" N	45° 52' 04" N	45° 41' 16" N	46° 25' 29" N	46° 25' 53" N
Longitudine	07° 48' 48" E	07° 51' 17" E	06° 57' 44" E	10° 40' 47" E	10° 42' 26" E
Quota m s.l.m.m.	1997	2502	1605	2283	2640
Inizio funz.	1995	1993	1994	1992	1992

Tab. 2 - Caratteristiche dei siti delle installazioni idrometrografiche ENEL.

	Felik	Lys+Carstelet	Indren	Schkeerpie	Netscho
N. Catasto	I/4L01302001	I/4L01302002	I/4L01302003	I/4L01302004	I/4L01302005
Area (1975) ha	185.8	1182.6	136.9	15.2	27.6
Area (1957) ha	179.0	1143.0	168.0	7.0	19.0
Esposizione bac. acc.	S	S	S	NW	NW
Esposizione bac. abl.	S	SW	S	NW	NW
Lunghezza max m	2450	5600	2400		450
Larghezza max m	1100	4350	1000		700
Quota max m	4175	4530	4130	3040	3090
Quota mediana m	3642	3732	3380		2953
Quota min m	2860	2350	3055	2555	2540
Tipo	montano	vallivo	montano	glacionevato	montano
Alimentazione	diretta	dir.+val.+teol.	dir.+val	valanghe	dir.+val.

Tab. 3 - Caratteristiche dei ghiacciai della Valle di Gressoney - dati del Catasto C.G.I. e W.G.I.



Sensore	posizione	trasdutt.	registraz. frequenza	campionamento	
				frequenza	durata
Temperatura aria TA	+ 5.50 m	Pt 100	2 h	2 h	istantaneo
Umidità relativa UM	+ 5.50 m	capac.	2 h	2 h	istantaneo
Temperatura neve TN	+ 0.20 m	Pt 100	2 h	2 h	istantaneo
Velocità vento VV	+ 6.00 m	eff. Hall	2 h	5 sec	2 min
Direzione vento DV	+ 6.00 m	potenz.	2 h	5 sec	2 min
Altezza neve HN	+ 5.50 m	Usonic	1 h	2 h	istantaneo
Radiaz. solare incid. RI	+ 5.50 m	cella Moll	1 h	5 min	1 h
Radiaz. solare rifl. RR	+ 5.50 m	cella Moll	1 h	5 min	1 h
Pressione atmosf. PA	+ 5.50 m	cella press.	2 h	2 h	istantaneo
Altezza idrometrica HW	- 0.20 m	cella press.	1 h	1 min	1 h
Temperatura acqua TW	- 0.20 m	Pt 100	1 h	1 min	1 h
Tensione batteria BV	interna	—	24 h	2 h	istantaneo
Temp. data-logger TD	interna	—	24 h	2 h	istantaneo

Tab. 4 - Caratteristiche della programmazione dei sensori

Data	9/6/92	16/4/93	4/6/93	7/6/94
spessore del manto (cm)	270	148	295	290
numero di strati identificati	19	5	15	16
livello della deposizione secca (cm)	—	—	201; <b>130</b>	<b>290</b>
data dell'evento di deposizione	—	—	25/4/93	
numero di campioni neve al suolo	27	15	31	28
numero di campione pluv. wet-only	—	22	32	26
equivalente in acqua (mm)	827	458	1052	1115
densità media	0.306	0.308	0.345	0.380
precipit. totali dal 1 ott. (mm)	591.4	547	878	838

Tab. 5 - Caratteristiche dei campionamenti di neve condotti a Colle Vincent .  
I valori di livello della deposizione in grassetto corrispondono alla data riportata nella riga sottostante.

total	W.E. mm	Na	NH4	K	Mg	Ca	Cl	NO3	SO4	ACI
<b>1992</b>	827	0.59	3.17	0.32	0.42	2.40	0.72	4.96	7.51	6.28
<b>1993</b>	1052	1.06	9.07	0.39	1.34	14.27	1.23	4.82	15.10	-4.99
<b>1994</b>	1115	2.25	14.20	0.66	2.70	18.53	2.78	13.44	18.44	-3.68

Tab. 6 - Medie pesate delle concentrazioni misurate nelle deposizioni di Colle Vincent ( $\mu\text{eq l}^{-1}$ )



	W.E. (mm)	Na	NH4	K	Mg	Ca	Cl	NO3	SO4	ACI
<b>deposizioni totali (meq m<sup>-2</sup>)</b>										
Careser 1994	1039	1.8	1.4	0.2	1.7	13.5	2.1	6.9	7.5	-2.0
Colle Vincent 1993	1052	1.1	9.5	0.4	1.4	15.0	1.3	5.1	15.9	-5.3
Colle Vincent 1994	1064	2.5	15.8	0.7	3.0	20.7	3.1	15.0	20.6	-4.1
<b>deposizioni sahariane (meq m<sup>-2</sup>)</b>										
Careser 1994	88	0.7	0.5	0.1	0.8	7.9	0.8	1.3	2.2	-5.7
Colle Vincent 1993	34	0.8	1.1	0.3	0.9	9.6	0.7	0.7	3.7	-7.4
Colle Vincent 1994	91	0.4	4.6	0.1	0.5	4.4	0.3	1.9	3.0	-4.8
<b>rapporto dep. sahar./dep. tot. (%)</b>										
Careser 1994	8.5	40.6	38.1	60.9	45.8	58.4	37.4	19.5	29.1	
Colle Vincent 1993	3.3	67.6	11.0	62.6	63.7	64.2	57.0	14.8	23.5	
Colle Vincent 1994	8.6	16.5	29.2	7.9	18.1	21.4	10.3	12.9	14.7	

Tab. 8 - Confronto tra la composizione delle deposizioni di origine sahariana e le deposizioni totali