Meteorologia applicata al volo delta

di Plinio Rovesti

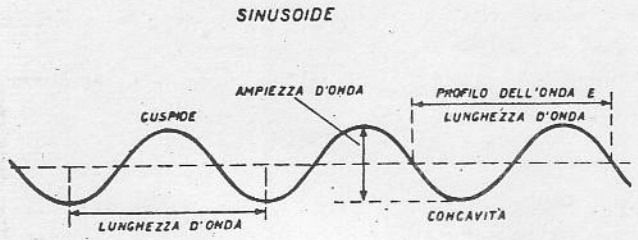
I MOVIMENTI ONDULATORI DELL'ATMOSFERA

Fino alla scoperta del cosidetto volo veleggiato in onda, le correnti che si producono sottovento alle catene montane sono state totalmente scartate dai piloti, che le giudicavano sfavorevoli al volo. Da quando però si scoprì che sopra la corrente vorticosa di sottovento si possono formare potenti onde atmosferiche nella cui parte ascendente si possono raggiungere in volo veleggiato grandi altezze, i piloti ed i meteorologi di tutto il mondo fermarono la loro attenzione sopra questi movimenti ondulatori dell'atmosfera, per studiarne la struttura e la dinamica. Esperienze, ricerche, studi si susseguirono, e e non senza eccellenti risultati.

TERMINOLOGIA

Prima d'iniziare la trattazione teorica dei movimenti ondulatori dell'atmosfera, riteniamo utile ed opportuno illustrare il significato di alcuni termini ai quali dovremo ricorrere sovente nel corso di questo articolo.

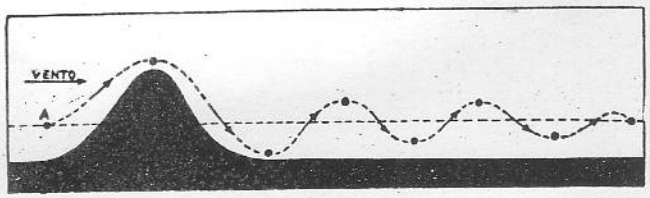
In qualsiasi movimento ondulatorio, sia di liquidi che di gas, si usa distinguere certe parti, tra loro differenti, che si ripetono uniformemente nella continuità del movimento stesso. Se immaginiamo di tracciare una linea retta, che taglia per il suo mezzo l'ondulazione che si osserva in una massa liquida o aeriforme, chiameremo "cuspide dell'onda" la parte che sta sopra quella linea, e "concavità dell'onda" quella che sta sotto. Nel segmento di linea retta che congiunge i due punti estremi della cuspide e della concavità è compreso il "profilo" dell'onda che si ripete uniformemente nelle ondulazioni susseguenti e che si suole assumere per determinare la "lunghezza d'onda". La distanza tra il vertice della cuspide e il fondo della concavità, si dice "ampiezza d'onda" **(fig. 1)**.



LE PRIME TEORIE

Dopo questo semplice ma necessario chiarimento di termini d'uso comune, affrontiamo lo studio di una delle prime teorie data dai volovelisti tedeschi per spiegare il meccanismo delle onde di sottovento. Si tratta di una teoria, per vero dire, poco soddisfacente ma di fatto utile sotto l'aspetto didattico. Secondo la stessa, una particella d'aria, in condizioni di equilibrio stabile, la quale investe, durante la sua corsa una catena montana, è forzata a salire lungo il pendìo di sopravvento e a spostarsi quindi dalla quota ove si trovava in equilibrio. Raggiunta la vetta, precipiterà naturalmente a valle, verso il suo primitivo livello. Senonché, per forza d'inerzia, anziché fermarsi a quel livello precipiterà più in giù, e di qui riprenderà poi a salire per tornare al suo livello di equilibrio. Ma neppure questa volta riuscirà a fermarsi: l'inerzia non le permetterà di stabilizzarsi sollecitamente; occorrerà un certo tempo in una più o meno lunga serie di oscillazioni degradanti, prima che essa ritorni al primitivo livello. Orbene queste oscillazioni verticali, associandosi alla traslazione orizzontale del vento, si risolvono in un movimento ondoso dell'atmosfera, il quale va diminuendo d'ampiezza di mano in mano che ci si allontana dalla catena montuosa che generò l'urto.

La **figura 2** ci dà un'idea della traiettoria seguita dalla particella d'aria A, appartenente ad una massa d'aria in condizione di equilibrio stabile. La particella, costretta a salire in quota dalla corrente dinamica di pendio, si espande, raffreddandosi adiabaticamente in ragione di 1°C per ogni 100 metri.



Perdendo temperatura essa diviene anche più pesante dell'aria che la circonda, così che superata la vetta della montagna essa precipiterà a valle, ricuperando gradatamente durante la discesa la temperatura primitiva e stabilizzandosi infine, dopo una serie di oscillazioni decrescenti, all'antico livello. Questa interpretazione elementare del fenomeno, fondata sulle prime esperienze di volo in onda, è stata successivamente modificata, e noi l'abbiamo riportata solamente perché riteniamo che conoscerla giovi a comprendere le successive interpretazioni.

CONDIZIONI IDEALI SECONDO LE PIÙ MODERNE TEORIE

Cominciamo col notare che le onde d'ostacolo che maggiormente interessano il volo veleggiato hanno carattere stazionario: sono cioé onde il cui profilo sinusoidale, rispetto al suolo, rimane fisso nello

stesso posto. Come è ovvio, tali onde assumono un'ampiezza di gran lunga superiore a quella di qualsiasi tipo di onda progressiva. Ciò dipende essenzialmente dal fatto che i moti ondulatori stazionari, effetuando sempre nello stesso posto la trasformazione di energia potenziale in energia cinetica, sono ininterrottamente alimentati dalla perturbazione che una corrente aerea subisce investendo un ostacolo sulla superficie terrestre. L'ostacolo, infatti, offrendosi in permanenza al flusso del vento, incrementa continuamente il movimento ondulatorio generato dall'urto. Com'è ovvio, quando la velocità orizzontale del vento è costante, il movimento ondulatorio è stazionario.
A questo punto è facile rendersi conto del perché le masse d'aria che entrano a comporre queste oscillazioni riescano ad interessare strati dell'atmosfera di gran lunga superiori a quelli che compongono le onde progressive. Rileviamo però che le onde d'ostacolo non potrebbero sorpassare i limiti della troposfera, se a loro volta non agissero come onde generatrici di oscillazioni di maggior potenza, tali da indurre nelle masse superiori moti capaci di estendersi a grandi altezze. Perché ciò avvenga, però, è necessario che negli strati superiori della troposfera il gradiente termico verticale vada aumentando con l'altezza. In tal modo negli strati suddetti, la stabilità atmosferica andrà gradatamente diminuendo fino al raggiungimento di condizioni di equilibrio vicine all'indifferenza. Se poi tale favorevole stratificazione termica in quota, sarà accompagnata da un progressivo aumento della velocità del vento con l'altezza, avremo quelle che potremmo definire "condizioni termodinamiche ideali" per la formazione dei grandi movimenti ondulatori che tanto interessano il volo veleggiato.

LE NUBI LENTICOLARI E D'ONDA

Un movimento ondulatorio (qualora non esista negli strati atmosferici nel cui seno si sviluppa umidità sufficiente per dar luogo al fenomeno della condensazione) passa del tutto inosservato agli occhi del pilota. Solamente le nubi, materializzando in un certo senso quel movimento, ne rivelano la presenza al pilota che vuol giovarsene per guadagnare quota.
Le nubi isolate fusiformi, prodotte da movimenti
Le nubi isolate fusiformi, prodotte da movimenti
ondualtori "secondari", vengono denominate "lenticolari" a cagione della caratteristica forma di lente (biconvessa o pianoconvessa o concavoconvessa) che spesso assumono rispetto alla sezione verticale **(fig. 3)**, e di osso di seppia rispetto alla vista in pianta

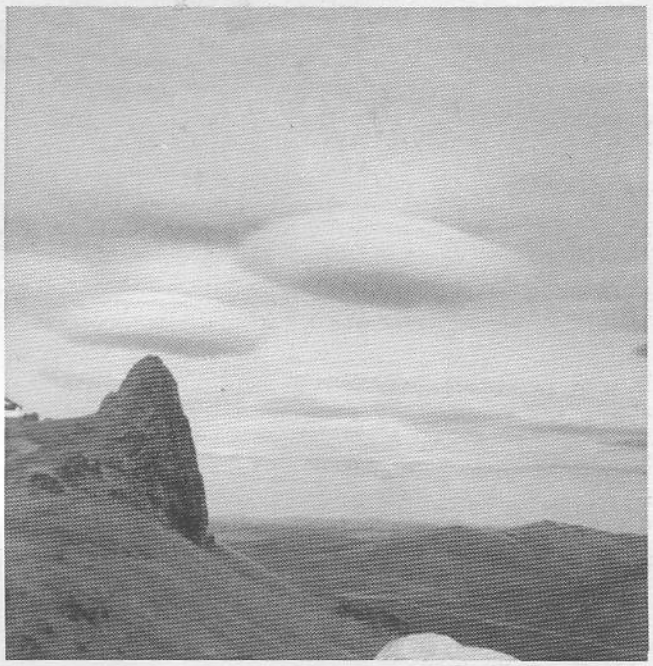


Fig. 3 - Nubi lenticolari fotografate sottovento alla Cordigliera delle Ande nella zona di San Carlos de Bariloche dal volovelista argentino Jose Cuadrado.

Fig. 4 - In primo piano a destra, vista in pianta di una nube lenticolare fotografata a Modena durante una sostituzione ondulatoria generata da forti venti da SW che investono l'Appennino tosco-emiliano. Si osservi la forma di osso di seppia della nube rispetto alla vista in pianta.

(fig. 4). Sono nubi bianche, dai contorni ben definiti, senza ombre proprie. Si formano a tutti i livelli, sulla superficie di deboli discontinuità per inversioni termiche o per salto di vento. Le iridescenze che talora le contornano rivelano che sono costituite da goccioline d'acqua.

Fig. 5 - Nube d'onda fotografata a Modena sottovento al Monte Cimone durante una situazione ondulatoria generata da forti venti sa SW.

Le nubi associate invece alle grandi onde del cosiddetto "Foehn libero", che si formano oltre i 5.000 metri d'altezza e raggiungono spesso gli estremi limiti della troposfera, sono denominate "nubi d'onda". Quando le lenticolari o le nubi d'onda si sovrappongono, danno luogo alle cosiddette "formazioni duplicate" **(Figg. 5 e 6).**

Una delle prime interpretazioni date dai volovelisti alle nubi formate dalle onde atmosferiche, parte dal presupposto che, durante un movimento ondulatorio le masse d'aria partecipanti alle oscillazioni si raffreddino e si riscaldino adiabaticamente e che, quando posseggono sufficiente umidità, diano luogo sulla cuspide di ogni onda alla formazione di una nube lenticolare. Tali nubi si generano costantemente

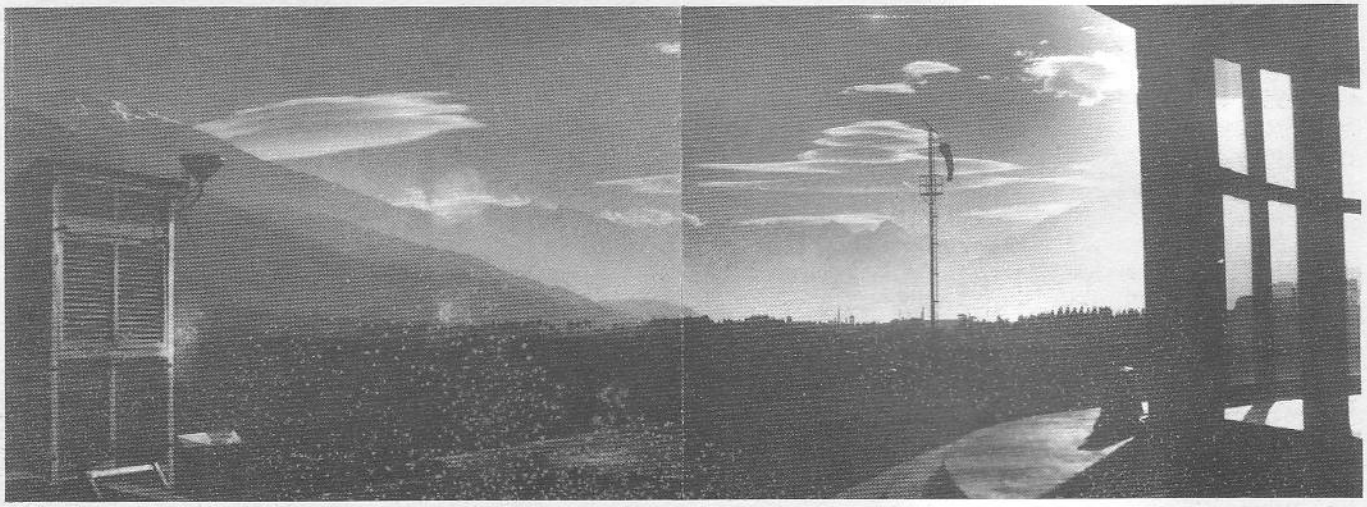


Fig. 6 - Situazione ondulatoria del 6 maggio 1962, ritratta dall'Aeroporto di Aosta. Le imponenti nubi lenticolari sovrapposte mettono in evidenza l'esistenza di intensi movimenti ondulatori di sottovento.

o di sopravvento e si dissolvono in quello di sottovento: si tratta quindi di nubi essenzialmente dinamiche. Tuttavia è noto che nubi lenticolari possono formarsi anche in strati non direttamente perturbati, e che spesso sono il risultato della deformazione o del sollevamento di cappe atmosferiche tranquille e ricche di umidità.

ONDE LOCALI

Nelle regioni poste sottovento ai pendii montani si formano spesso, anche con venti deboli, nubi lenticolari locali, dovute appunto al sollevamento di cappe atmosferiche stratificate, ricche di umidità. Le cuspidi delle onde si rendono così visibili per la formazione di altrettanti lenticolari, i cui contorni sono più nitidi e l'aspetto più simile alla lente, se lo strato sollevato dalle cuspidi del movimento ondulatorio, è superiormente limitato da una inversione termica. Chi scrive ebbe spesso modo di osservare e studiare la formazione di tali nubi nelle valli di Calamuchita e di La Cruz, sottovento alle Sierre Cordovane, in Argentina **(fig. 7)**.

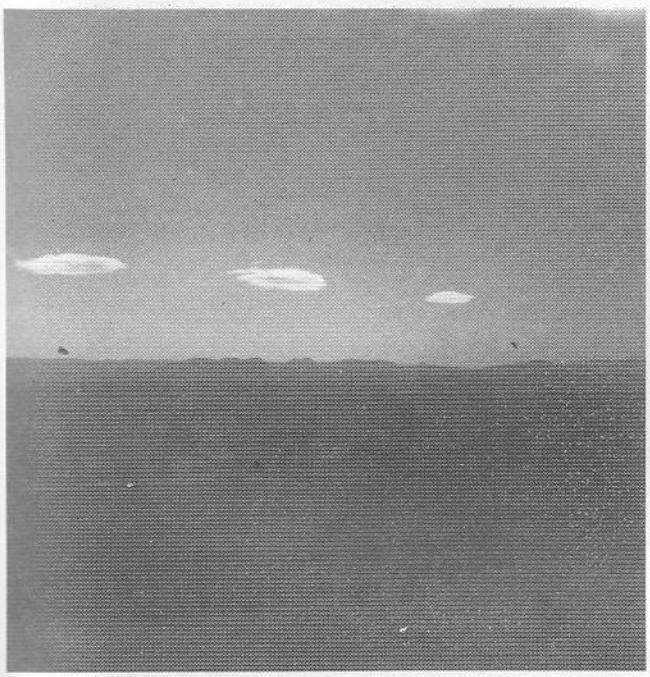


Fig. 7 - Nubi lenticolari prodotte da deboli venti da Ovest nella valle di Calamuchita, sottovento alle Sierre cordovane in Argentina.

Per ciò che interessa il volo veleggiato è utile notare che queste nubi lenticolari sono quasi sempre associate a movimenti ondulatori locali, ossia ad onde isolate, che si formano in seno a correnti basse, perturbate dagli innumerevoli ostacoli orografici che la superficie terrestre presenta. La loro formazione, quindi, non ha luogo solamente con vento di Foehn, ma anche con venti locali, cioé di 15/20 Km/h. Sovente queste nubi appaiono anche sottovento a picchi isolati. La lunghezza d'onda dei movimenti ai quali sono associate varia dai 2 ai 10 Km e nella loro parte ascendente non si trovano velocità verticali superiori ai due metri per secondo. Le nubi d'onda associate ai grandi movimenti ondulatori caratteristici del tempo di Foehn, si formano invece negli alti strati della troposfera dove le correnti aeree superano spesso i 100 Km/H e possono produrre lunghezze d'onda dell'ordine di 40-45 Km. **Nella parte ascendente di questi movimenti sono state registrate velocità verticali di oltre 10 metri per secondo.** Essi presentano grande interesse per il volo a vela, ma non sono di facile utilizzazione per il volo delta per il fatto che si propagano a grandi altezze, tanto da raggiungere spesso la stratosfera. Le nubi d'onda che spesso caratterizzano questi movimenti ondulatori, sono costituite da estesi banchi, densi al centro, quasi trasperenti ai bordi, dove presentano talvolta ondulazioni dovute alla sovrapposizione di un altro movimento ondulatorio. Per l'aspetto sono simili a certe nubi temporalesche, da cui tuttavia differiscono per il bordo brillante che presentano dalla parte di sopravvento **(fig. 8)**. Questo, talvolta appare non ben definito, ma frastagliato in cunei nettamente delimitati. Ora, è proprio sotto questi cunei che i piloti trovano le più vigorose ascendenze.

Fig. 8 - Nubi d'onda ritratte sulla Cordigliera delle Ande con forte vento da Ovest. Si tratta di una formazione con lenticolarari sovrapposte frastagliate in cunei nettamente delimitati.

LA "CONTESSA DEL VENTO"

Tra le nubi d'onda va annoverata in Italia la "Contessa del vento", caratteristica formazione nuvolosa di proporzioni grandiose, che si formano sottovento all'Etna, nella valle del Bove, con forti venti da Nord Ovest, e che presenta spesso ben distinte quattro formazioni lenticolari sovrapposte. Vanno pure annoverate tra le nubi d'onda quella ben conosciuta in Germania con nome di "Moazagotl" e molte altre che si formano sulle grandi catene montuose, quali le Alpi, la Cordigliera delle Ande, la Sierra Nevada californiana ed altre ancora.

NUBE ROTORE

Negli strati sottostanti alla corrente ondulatoria il cui flusso è perfettamente laminare, si riscontra sempre una turbolenza fortissima, talora anzi violenta. Infatti in corrispondenza con la cuspide della prima onda (e spesso anche della seconda e delle seguenti) si formano vortici d'aria ad asse orizzontale, i quali, quando ha luogo la condensazione, sono resi visibili nella loro parte superiore da file di fractocumuli dall'aspetto molto turbolento. Questi rulli cumuliformi costituiscono così la parte superiore di un "rotore", che normalmente arriva ad una altezza uguale a quella della catena montana che provoca il movimento ondulatorio **(fig. 9).**

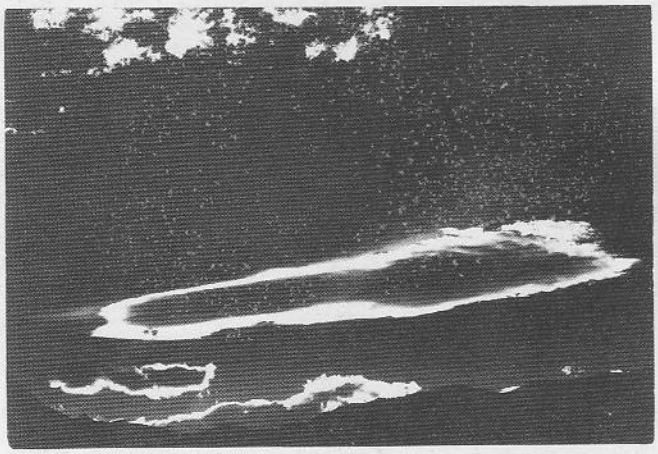
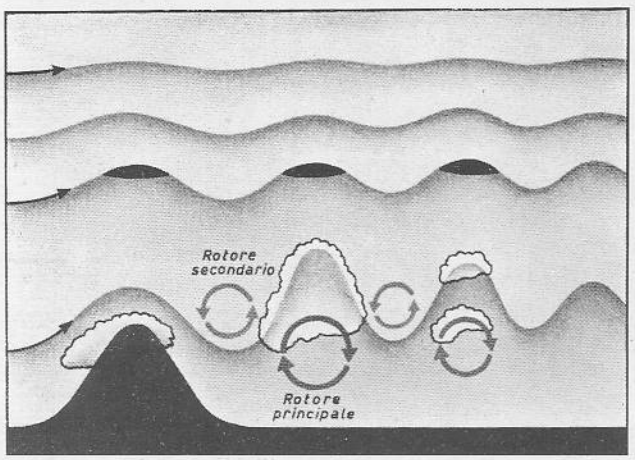


Fig. 9 - Altocumulo lenticolare ritrattao in Val Sangone (Torino) dal volovelista Vittorio valesio. La nube dall'aspetto cumuliforme che appare a sinistra sotto la lenticolare è una nube-rotore che si è formata nello strato subondulatorio caratterizzato da una forte turbolenza termodinamica.

Le correnti ascendenti e discendenti che compongono questi rotori sono assai turbolente ed assumono particolare violenza quando gli strati superficiali sono instabili ed il vento aumenta rapidamente d'intensità con l'altezza. In questo ultimo caso possono anche formarsi dei rotori secondari, aventi un senso di rotazione inverso a quello dei rotori principali **(fig. 10).**



ROTORI DI NOTEVOLI DIMENSIONI CON ROTORI SECONDARI dovuti a forte instabilità negli strati inferiori ed al rapido aumento del vento con la quota

Sfruttando la parte ascendente del rotore (che si trova sempre verso la montagna) si riesce sempre a raggiungere la quota influenzata dal movimento ondulatorio, il quale orienta la parte superiore delle nubi rotori in direzione alla pianura **(fig. 11).**
Le correnti che compongono questi rotori, per la turbolenza e violenza che le caratterizzano non sono sfruttabili da parte dei deltaplani, i quali possono fare del volo d'onda soltanto in movimenti ondulatori di moderata intensità.

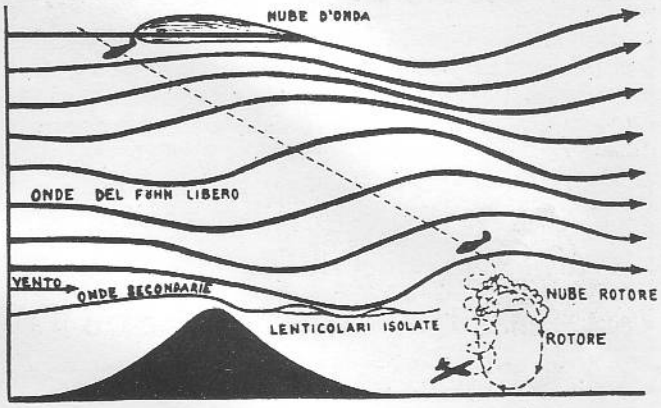


Fig. 11 - La quota interessata dal movimento laminare ondulatorio può essere raggiunta sfruttando la parte ascendente del rotore di sottovento. Si sconsiglia però ai deltaplanisti di ricorrere a questo sistema pr la violenta turbolenza regnante nello strato suprficiale subondulatorio.

RISONANZA

Accade spesso che le onde stazionarie d'ostacolo siano rafforzate da fenomeni che si usa definire di risonanza (prendendo il concetto e la parola dalla acustica), dovuta alla presenza di altre catene montuose sottovento, quando abbiano andamento parallelo a quello della catena principale. Tuttavia, queste catene secondarie conferiscono nuovi impulsi al moto ondulatorio, prodottosi per l'urto contro la catena principale, solo quando la lunghezza d'onda sia eguale alla distanza esistente tra una catena e l'altra, vale a dire quando la distanza che separa le linee di cresta delle montagne, è un multiplo della lunghezza d'onda generata dalla prima catena. Quando questa non si abbia, il rimbalzo della corrente aerea sulle catene montuose secondarie, anzi che provocare una amplificazione del sistema ondulatorio già in atto interferisce sfavorevolmente su di esso, determinando l'indebolimento o addirittura l'annullamento delle onde **(fig. 12).**
La **fig. 13** mostra come una sopraelevazione raccordata con un altopiano, sia sufficiente per dare origine ad un movimento ondulatorio quando sia investita da una corrente orizzontale. Dalle esperienze di volo condotte dai vari piloti risulta però particolarmente vigorosa soltanto la prima onda. Il Lyra ha calcolato teoricamente, per un caso similare, la grandezza della perturbazione ondulatoria derivante da un flusso inizialmente omogeneo. La **figura 13** rappresenta l'andamento delle linee di corrente e mostra, appunto secondo il Lyra, come un movimento ondulatorio generato da una sopraelevazione del suolo, raccordata con un altipiano, acquisti particolare valore soprattutto le prima onda.

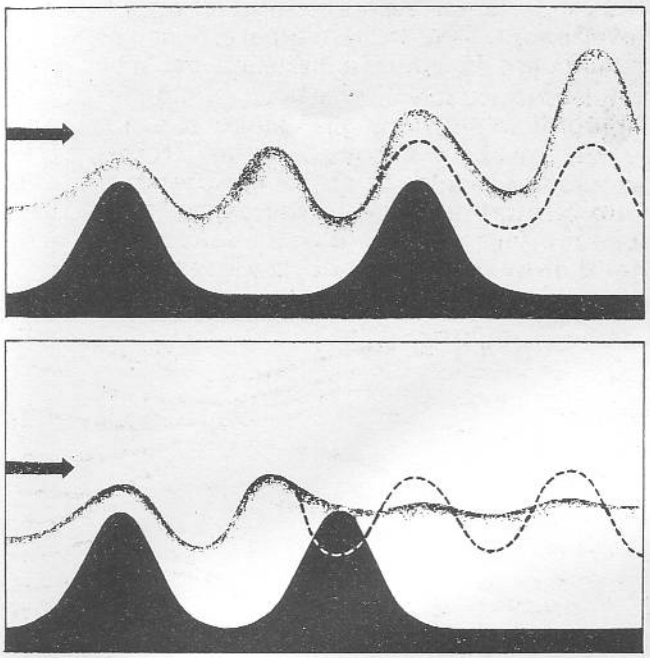


Fig. 12 - Le catene montane secondarie conferiscono nuovo impulso al movimento ondulatorio innnescato dalla catena principale, solo quando la lunghezza d'onda sia eguale alla distanza esistente tra una catena e l'altra.

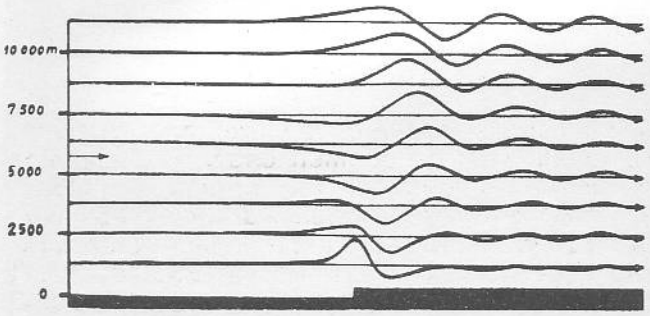


Fig. 13 - Andamento delle linee di corrente in un movimento ondulatorio del suolo raccordata con un altipiano, secondo Lyra.

Aggiungiamo che, quando la zona di sottovento di una catena montuosa è livellata da una massa d'aria fredda, il fenomeno ondulatorio acquista caratteristiche simili a quelle di una sopraelevazione raccordata con un altipiano. Nel caso poi che dai due lati di una catena montuosa esistano masse d'aria fredda stagnanti, o masse scorrenti parallelamente alla catena stessa, i fenomeni ondulatori prodotti da una eventuale corrente aerea superiore che investa normalmente la cima delle montagne, vengono notevolmente attenauti, giacché è come se diminuisse l'altezza dell'ostacolo.

Anche il brusco aumento di attrito che una corrente aerea subisce passando da una superficie liscia e piana, quale potrebbe essere una città costiera, può dar luogo alla formazione di un moto ondoso atmosferico. Gli ostacoli terrestri investiti dal vento, frenano, infatti, la corrente, conferendole gli impulsi necessari per la formazione delle ondulazioni. Anche in questo caso, però, il fenomeno ondulatorio dopo la prima onda, va rapidamente smorzandosi.

Citeremo infine il caso di una corrente aerea che sorpassi un avvallamento del terreno; e diremo che, anche in queste condizioni si possono formare movimenti ondulatori abbastanza efficaci, a condizioni però che l'avvallamento sia ampio e profondo. È facile capire che quando una valle è livellata da una massa d'aria fredda, come succede spesso durante la stagione invernale o durante le ore notturne, le correnti aeree che la sorpassano non subiscono nessuna perturbazione ondulatoria.

IN SINTESI

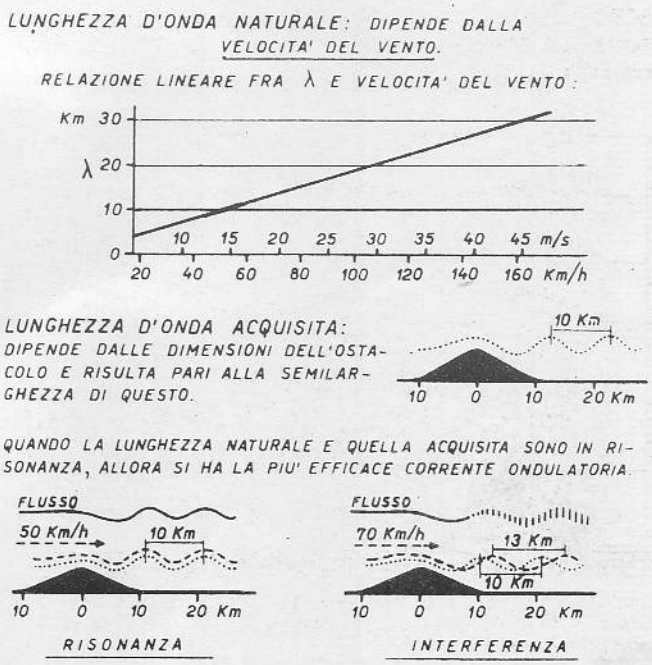
Se volessimo esporre con sufficiente ampiezza e con precisione scientifica tutti i fenomeni associati ai movimenti ondulatori dell'atmosfera, troppo ampio spazio dovremo ancora dedicare all'argomento. Cercheremo pertanto di riassumere in breve i principi che governano la formazione delle onde d'ostacolo così come hanno potuto essere formulate dai meteorologi sulla scorta delle esperienze condotte fin qui. Com'è ovvio, in questa sintetica rassegna richiameremo anche le considerzioni svolte finora.

1) Una massa d'aria che investe un ostacolo con sufficiente velocità assume, senza apporto di energia esterna, un movimento ondulatorio nella zona sottovento all'ostacolo stesso.

2) Le condizioni migliori si hanno quando il vento soffia perpendicolarmente alla catena montana, con una forza non inferiore a 30 Km/h. Tuttavia, il movimento ondulatorio si può formare anche quando il vento investe diagonalmente la montagna, purché la rotazione, rispetto alla perpendicolare, non superi I 45°.

3) Il vento in quota deve rimanere costante o, meglio ancora, aumentare gradatamente d'intensità con l'altezza.

4) I caratteri delle ondulazioni sono determinati anche dalla larghezza, dalla forma e dall'altezza dell'ostacolo. Gli ostacoli ripidi, aumentano le grandezze delle deviazioni e conseguentemente, il valore dei primi angoli di proiezione e di caduta **(fig. 14).**



5) Nel processo di formazione dei movimenti ondulatori di ostacolo, le condizioni di equilibrio regnanti nei bassi strati non sono determinanti. Infatti, esse possono essere indifferentemente, "stabili" o "instabili", sino all'altezza della catena montana. Quello che maggiormente importa è che, al di sopra di tale altezza esistano stratificazioni termicamente stabili.
6) Dopo il tramonto del sole, in seguito alla formazione dell'inversione negli strati superficiali, la turbolenza nei rotori si affievolisce, il flusso ondulatorio laminare si abbassa ed assume una più chiara organizzazione.
7) L'esistenza di inversioni di temperatura sopra il livello delle montagne non è indispensabile per la formazione delle onde. Nelle inversioni termiche, però, grazie alla forte stabilità ivi regnante, i movimenti ondulatori acquistano maggiore ampiezza e si propagano più facilmente negli strati superiori, soprattutto quando il vento aumenta o rimane costante con la quota.
8) Uno strato instabile in quota può arrestare un movimento ondulatorio. Al di sopra di questo strato limite può formarsi tuttavia un nuovo treno d'onde, il quale però generalmente, è irraggiungibile in volo veleggiato.
9) Il grado di stabilità termica della massa d'aria, influisce sulla larghezza d'onda e soprattutto sulla ampiezza verticale. Quando la stabilità aumenta, la lunghezza d'onda decresce e l'ampiezza aumenta.
10) La lunghezza d'onda è direttamente proporzionale alla stabilità termica dell'aria.
11) La prima onda è leggermente più corta delle altre, ma la sua ampiezza verticale è maggiore.
12) Un movimento ondulatorio si dice stazionario quando il profilo sinusoidale che costituisce le onde, rispetto alla catena montuosa, rimane fisso nello stesso posto.
13) Per quanto riguarda i fenomeni che si riscontrano negli strati superficiali del flusso subondulatorio, sottovento ai pendii montani, è molto importante rilevare che l'aria fohnizzata, superando la linea di cresta, non si stacca dal pendio sottovento, ma rasente al pendio stesso, scende a valle, impedendo la formazione di quei vortici ad asse orizzontale cui abbiamo accennato esaminando i fenomeni associati alle correnti dinamiche di pendio. Tale comportamento del vento di caduta, è dovuto al fatto che è costituito da un moto gravitazionale oltre che di accelerazione, per la differenza di pressione esistente fra i due versanti.

PLINIO ROVESTI

(continua)