

# TURBULENT STRESSES ON THE SEA SURFACE

HENRY CHARNOCK

Saclant Asw Research Center - La Spezia

Long period changes in sea level measured at a point on the land are mainly brought about by changes in the amount of water in the ocean by changes in its density structure or by tectonic processes.

The magnitude of climatic changes in the ocean is not established, nor is the physical mechanism understood. The same is true of tectonic processes. There is therefore no method, at the moment, of forecasting long-period changes in mean sea level.

Shorter-period meteorological effects on sea-level, however, being brought about by the turbulent stresses at the sea surface, are better understood. The stresses have been much studied, both from a general point of view and for their relevance to practical problems, in particular those involved in the generation and propagation of destructive surges.

My short contribution to today's discussion will outline our present knowledge of these stresses on the sea-surface. The effect of varying atmospheric pressure will be treated briefly while methods of measuring the tangential stress, the drag of the wind on the sea, will be discussed somewhat more fully.

## THE EFFECT OF ATMOSPHERIC PRESSURE CHANGES ON SEA -LEVEL

If there are no currents the space variations of atmospheric pressure over a water surface can be compensated by a corresponding slope of the free surface.

On the assumption that the average pressure over the surface is constant,

and if there are no dynamical effects, this implies a linear relation between variations of atmospheric pressure and of sea-level. This is known as the water-barometer effect, wherein a rise of atmospheric pressure of one millibar is accompanied by a compensating fall of sea-level of a little more than one centimetre.

In some cases observations have verified this result. For others it has been found that changes in sea-level and changes in atmospheric pressure are approximately linearly related but the factor of proportionality differs from the predicted one.

The relation does not hold for long-period fluctuations in sealevel, where steric and other effects may become important, nor for high-frequency fluctuations important to the generation and propagation of surface waves. For period of the order of a day, however, the linear relation, with an empirically determined factor, can be very useful.

#### THE DRAG OF THE WIND ON THE SEA

Many methods have been used to measure the drag of the wind on the sea, but they are of four main types. The first technique attempts to get information from the wind-tilt of enclosed bodies of water. When wind blows over a lake the surface becomes tilted upwards towards the lee end. Measurements of the mean slope, which typically would be of order one inch in ten miles, can provide estimates of the wind drag. There are theoretical difficulties associated with end effects, but the major difficulties are practical: one needs steady conditions, and although the surface waves can be filtered out to permit observations of the necessary accuracy it is often hard to eliminate the long-period oscillations of the whole body of water which are known as seiches.

A second method involves the measurement of the vertical distribution of the mean wind in the lowest few metres of air over the sea. When the air and the water are at the same temperature the wind speed increases as the logarithm of the height and its rate of increase provides a measure of the wind drag. This method is empirical, but it is well established; the difficulties are of engineering rather than of science. It is difficult to get instruments of the necessary precision (the wind speed has to be measured

to about one centimetre/second) and even harder to expose them over water in such a way that their supports do not interfere with the wind or the waves or the currents. For this reason many of the observations have been made in lakes and in shallow water, although some workers have developed techniques for making wind measurements accurately enough from a small ship.

A third technique again involves measuring the vertical distribution of the mean wind, but this time to greater heights. In steady conditions the drag of the wind on the sea can be inferred from the component of the wind across the isobars, so that for this method accurate measurements of the distribution of atmospheric pressure are necessary as well as accurate wind observations. It turns out that this method does not work well in middle latitudes because the wind blows at only a small angle to the isobars in the lowest kilometre or so. It works better in the Trades, where attempts to use it have met with moderate success.

The fourth technique again requires detailed wind measurements, in this case detailed in time by using an instrument of rapid response, reacting in about one-tenth of a second, say. Measurements are made of both the horizontal and the vertical components of the wind and then their mean product provides the drag. There are again some theoretical difficulties in the interpretation of the results, but they can probably be got over. The major difficulties are again of getting suitable instruments suitably exposed, and of the large amount of numerical analysis which has to be done to get the results. On the other hand, the method provides detailed information on the structure of the turbulent flow, and it will be increasingly used as data-handling systems develop and become available. A further attraction of this method is that estimates of evaporation and direct heat transfer can be made by measuring fluctuations of humidity and temperature as well as those of the vertical velocity component.

It may be thought that with all these methods available there would be substantial agreement about the drag on the sea produced by a given wind. Such is not the case; there are many discrepancies in the published results which are difficult to reconcile. There is some agreement that the drag is small relative to that of a fixed solid surface with the same geometry, and that the drag increases with wind speed somewhat more rapidly than the square of the wind speed. The wind

does seem to be the main factor, but the temperature difference between air and sea has a measurable effect. It has also been suggested that naturally occurring thin films of surface active agents have a bigger effect on the hydrodynamics and aerodynamics of the sea surface than has generally been supposed.

For practical reasons few observations have been made in the strong winds typical of storm-surge situations. For these the windtilt method is perhaps most appropriate and indicates that the drag of the wind can be taken as proportional to the product of the square of the wind-speed and the air density. The factor of proportionality is about 0.002.

## CONCLUSION

Meteorologically induced variations in sea level can be predicted, by semi-empirical methods, from forecasts of wind and atmospheric pressure. For longer period variations in sea-level there is at present no satisfactory method of prediction.

## SFORZI TURBOLENTI SULLA SUPERFICE MARINA

(Traduzione)

H. Charnock, Saclant Asw Research Center, La Spezia

Le variazioni lente del livello medio marino, misurate rispetto ad un punto della terraferma sono principalmente dovute alla variazione della quantità, d'acqua nell'oceano, a suoi cambiamenti nella distribuzione della densità ed a fenomeni tettonici.

L'ampiezza delle variazioni indotte dal clima nell'oceano non è nota nè si riesce a comprenderne il meccanismo fisico; lo stesso avviene per i fenomeni tettonici.

Non c'è quindi, per ora, alcun metodo che permetta previsioni a lungo raggio sul livello medio del mare.

Gli effetti meteorologici di più breve durata, dovuti a sforzi di carattere turbolento sulla superficie marina, sono invece meglio compresi; tali sforzi sono stati molti studiati sia da un punto di vista generale che per scopi pratici, in particolare, per quanto riguarda la formazione e la propagazione di mareggiate distruttive.

Il mio breve contributo alla discussione odierna descriverà i principali aspetti dell'attuale conoscenza sugli sforzi alla superficie; l'effetto delle variazioni di pressione atmosferica verrà appena accennato mentre verranno trattati un po' più a fondo i metodi di misura per lo sforzo tangenziale, cioè la spinta del vento sul mare.

## L'EFFETTO SUL LIVELLO MARINO DELLE VARIAZIONI DI PRESSIONE ATMOSFERICA

In assenza di correnti le variazioni spaziali di pressione atmosferica possono venir compensate da un'opportuna pendenza della superficie libera; nell'ipotesi che la pressione media sulla superficie sia costante e che non intervengano effetti dinamici, si avrebbe una variazione lineare fra le variazioni di pressione atmosferica e quelle di livello marino.

Questo effetto è noto come idro-barometrico : con l'aumento di un millibar della pressione atmosferica il livello marino decresce di poco più di un centimetro.

In alcuni casi le osservazioni sono in accordo con questo risultato; in altri si è notato che, pur essendovi una relazione approssimativamente lineare fra le variazioni di pressione atmosferica e di livello marino, il coefficiente di proporzionalità differisce da quello previsto.

La relazione non è verificata per le fluttuazioni lente del livello marino, nelle quali assumono importanza vari effetti, fra i quali quello sterico, nè per le fluttuazioni ad alta frequenza caratterizzate dalla generazione e propagazione di onde superficiali.

Tuttavia, per intervalli di tempo dell'ordine di un giorno, la relazione lineare, con un coefficiente da determinare empiricamente, può essere molto utile.

## LA SPINTA DEL VENTO SUL MARE

Sono stati usati molti metodi per misurare la spinta del vento sul mare ma essi appartengono, essenzialmente, a quattro tipi principali.

La prima tecnica cerca di ricavare tale informazione dall'inclinazione prodotta dal vento in bacini; se soffia vento su di un lago, la superficie viene inclinata, verso l'alto dal lato sottovento; la misura della pendenza media, i cui valori tipici sarebbero dell'ordine di un pollice per dieci miglia, può dare una stima della spinta esercitata.

Ci sono difficoltà teoriche per quanto riguarda gli effetti al contorno, ma le maggiori difficoltà sono pratiche: necessitano condizioni stazionarie e, pur essendo possibile eliminare l'effetto delle onde superficiali in modo da avere osservazioni di sufficiente precisione, è spesso difficile eliminare l'effetto delle oscillazioni a lungo periodo dell'intera massa d'acqua, note come sesse.

Un secondo metodo sfrutta la misura della distribuzione verticale media del vento in uno strato di pochi metri al di sopra della superficie; se l'aria e l'acqua hanno la stessa temperatura, la velocità del vento aumenta col logaritmo dell'altezza, secondo un coefficiente di proporzionalità che dà una misura della spinta esercitata.

Questo metodo è empirico ma molto sicuro; le sue difficoltà di carattere tecnico più che scientifico; è difficile ottenere strumenti di sufficiente precisione (la velocità dev'essere misurata con una tolleranza di circa 1 cm/sec) ed è ancor più difficile esporre gli strumenti in modo che i loro supporti non vengano ad interferire col vento, le onde o la corrente.

Perciò gran parte delle osservazioni di questo tipo sono state fatte sui laghi od acque basse, sebbene alcuni ricercatori abbiano sviluppato tecniche per misurare abbastanza accuratamente il vento anche da una piccola nave.

Una terza tecnica si rifà ancora alla misura della distribuzione verticale del vento, però ad altezze maggiori; in condizioni stazionarie si può stimare la spinta del vento sul mare dalla componente che attraversa le isobare; il metodo perciò richiede misure accurate sia della distribuzione della pressione atmosferica che del vento.

Ne deriva che questo metodo non è adatto alle medie latitudini dato, che il vento forma un angolo piccolo con le isobare fino a circa un chilometro d'altezza; il metodo è più adatto agli alisei, dove i tentativi di applicarlo hanno avuto un certo successo.

La quarta tecnica ricorre ancora a misure del vento, studiandone in dettaglio le variazioni nel tempo: si deve quindi far uso di uno strumento rapido, con un tempo di risposta dell'ordine del decimo di secondo.

Vengono misurate sia la componente orizzontale che quella verticale del vento ed il valor medio del loro prodotto dà la spinta.

Anche in questo caso ci sono delle difficoltà teoriche nell'interpretazione dei risultati; è probabile però che si possa superarle.

Le maggiori difficoltà riguardano però, anche in questo caso, la bontà e la corretta disposizione degli strumenti e la notevole quantità di analisi numerica necessaria ad ottenere i risultati.

D'altra parte il metodo fornisce dettagliate informazioni sulla struttura del flusso turbolento ed il suo uso andrà estendendosi con lo sviluppo di metodi per la manipolazione dei dati.

Un'ulteriore pregio di questo metodo è che la misura delle fluttuazioni dell'umidità e della temperatura, assieme a quella della componente verticale delle velocità, permette di stimare l'evaporazione e gli scambi termici.

Si potrebbe pensare che, avendo a disposizione tutti questi metodi, si ottengano valori sostanzialmente concordanti per la spinta prodotta sul mare da un determinato vento; ciò purtroppo non avviene e nei risultati pubblicati si notano discordanze difficilmente conciliabili.

C'è un discreto accordo sul fatto che la spinta è piccola rispetto a quella su di una superficie fissa e solida colla stessa geometria e sul fatto che tale spinta aumenta con la velocità del vento secondo una potenza in qualche modo superiore a due.

Il vento sembra essere il fattore principale, ma anche la differenza di temperatura fra l'aria ed il mare ha un effetto misurabile; è stato pure suggerito che sottili lamine naturali di sostanze con particolari caratteristiche di contatto abbiano un effetto maggiore di quanto comunemente si creda sulla dinamica del sistema.

Per cause pratiche si hanno poche osservazioni in venti forti, caratteristici di violente mareggiate; in tali casi la misura dell'inclinazione è forse più appropriata ed indica che la spinta del vento può essere considerata proporzionale al prodotto del quadrato della sua velocità per la densità dell'aria, secondo un fattore di circa 0.002.

## CONCLUSIONI

Mentre si possono prevedere le variazioni di origine meteorologica del livello marino da previsioni sul vento e sulla pressione atmosferica, non c'è attualmente alcun soddisfacente metodo di previsione per variazioni a lungo periodo.

## DISCUSSIONE

**PRESIDENTE:** Ringrazio il Dr. Charnock per questa interessante comunicazione e apro la discussione. C'è qualcuno che desidera chiarimenti?

**GROEN:** Mr. Chairman, I should like to make one remark in connection with what Mr. Charnock has said, namely in connection with the first way to measure the stress, which he discussed. There is one more complication in this method of measuring the stress, namely that the wind also generates a circulation in the water in a vertical plane so that the slope of the water is not only determined by the surface stress, but also by the secondary bottom stress. On the other hand, if we are going to use values of the stress for computing sea level heights, then this method I think is very suitable because, although we have certain effects which do not belong to the stress itself, these effects also affect the sea level. Thank you..

**CHARNOCK:** I agree with Professor Groen. He is of course right in saying that the bottom stress should not be neglected. It is, however, often small compared to the stress on the surface and then the error made by neglecting it can probably be neglected.

Again I agree that for forecasting sea-level heights the wind method is the most suitable but I would like to add that a knowledge of the surface stress is important in the calculation of the heat transfer or the rate of evaporation.

**PRESIDENTE:** Ricorderò che il Dr. Charnock dirige il Gruppo Oceanografico del Centro di Ricerche Saclant alla Spezia e che egli da parecchi anni svolge delle ricerche nel Tirreno.

Devo annunciare una piccola modificazione del programma. Il Col. Cerasuolo ha avvertito che domani non potrebbe svolgere la sua relazione e prega di poterlo fare attualmente. D'altra parte l'organizzazione del Convegno sul « Problema di Venezia » ci avverte che questa sera dobbiamo finire un po' presto perchè in questa sala si svolgerà un ricevimento offerto dalla Fondazione Cini ai Congressisti. Perciò penso che potremmo terminare la seduta odierna con la relazione del Col. Cerasuolo e rimandare le altre a domani mattina.

E ora, la parola al Col. Cerasuolo. Credo che la sua relazione sia abbastanza connessa con quella del Dr. Charnock.