



Doctoral Thesis

## Turbulent mixing in the surface boundary layer of lakes

**Author(s):**

Simon, André

**Publication Date:**

1997

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001843543> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

**Diss. ETH ex. B**

18. Nov. 1997

Diss. ETH No. 12272

# Turbulent mixing in the surface boundary layer of lakes

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZÜRICH  
for the degree of  
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by  
Dipl. Phys. ETH André Simon  
born 29 March 1970  
citizen of Undervelier, Switzerland



CatE

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. D.M. Imboden, examiner  
Dr. A. Wüest, co-examiner  
Prof. Dr. T. Stocker, co-examiner

1997

*J. Imboden*

14.10.97

## Résumé

La physique de la couche superficielle des lacs ou des océans conditionne largement l'intensité des échanges d'impulsion, de chaleur et de masse entre l'atmosphère et la colonne d'eau. Ce travail s'attache à quantifier le rôle des contraintes liées au vent pour le mélange dans la couche superficielle. L'influence des vagues de surface, des interactions vagues-courants et du champ de vitesses turbulent est analysée séparément. Pour y parvenir, nous distinguons trois aspects. Premièrement, les contraintes extérieures (vent et vagues) sont mesurées et définies. Deuxièmement, un ensemble important de dissipation de l'énergie cinétique turbulente est collecté pendant différentes conditions atmosphériques. Troisièmement, des outils analytiques reliant les contraintes extérieures à la dissipation sont développés.

Un système de mesure pour estimer la dissipation dans la couche superficielle est présenté. Des outils statistiques spécifiques à l'analyse de mesures turbulentes sont élaborés. En particulier, l'avantage lié à l'utilisation de la technique du bootstrap pour estimer l'écart-type d'ensembles à fort caractère intermittent est démontré.

Cette recherche analyse essentiellement les données collectées lors d'une campagne de mesures de 12 jours menée sur le lac de Neuchâtel (Suisse) en mars 1996.

Par inversion d'un modèle unidimensionnel calculant l'énergie des vagues, le flux vertical d'énergie de l'atmosphère vers la colonne d'eau est quantifié. Entre 1.5% et 3.5% du flux d'énergie total ( $:= \rho_{Air} C_D v_{10}^3$ ) est transféré dans les vagues. Parce que le fetch n'est pas illimité, environ 50% de cette énergie est transporté horizontalement sur la côte. Le reste est disponible pour le mélange turbulent de la colonne d'eau.

Le flux d'impulsion turbulent vertical gouverne essentiellement la production d'énergie cinétique turbulente liée à la tension de Reynolds. Trois facteurs sont considérés dans l'estimation de cette tension. Premièrement, pour des vitesses de vent inférieures à  $4 \text{ ms}^{-1}$ , le coefficient de résistance augmente quand le vent diminue en intensité. Deuxièmement, la stabilité atmosphérique influence l'intensité du transfert. Dans un régime caractérisé par des vents faibles, le coefficient de résistance peut être réduit de moitié quand la stratification atmosphérique est stable. Réciproquement, quand la stratification atmosphérique est instable, le coefficient de résistance peut croître de 20%. Troisièmement, la présence d'une tension liée à la présence des vagues peut diminuer la tension de Reynolds dans la colonne d'eau en-dessous de la zone d'influence des vagues de 50%. Cette réduction de la tension de Reynolds est liée à l'accélération de vagues non complètement développées.

La dissipation dans la couche superficielle est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Par des modifications appropriées de la vitesse de friction dans l'eau, les profils de dissipation en dessous de la zone d'influence des vagues sont reproduits en utilisant le modèle de la loi du mur. L'erreur est de l'ordre d'un facteur trois.

Dans la zone d'influence des vagues (épaisseur :  $(2k)^{-1}$ , typiquement de l'ordre du mètre dans le lac de Neuchâtel), la dissipation est 3 à 10 fois plus importante que les valeurs prédites par la loi du mur. Nous montrons que cet accroissement de la dissipation est

lié à deux sources supplémentaires d'énergie cinétique turbulente. Premièrement le flux d'énergie par les vagues déferlantes relève du même ordre de grandeur que les dissipations supplémentaires observées. Deuxièmement, l'interaction entre la vitesse de Stokes et le courant moyen induit une deuxième source d'énergie cinétique turbulente, également du même ordre de grandeur. Les données recueillies ne permettent pas de déterminer lequel des deux processus est responsable des dissipations supplémentaires observées. Une combinaison des deux processus est également possible.

Des mesures dans la couche superficielle convective suggèrent qu'en dessous de la profondeur de Monin-Obukhov, la dissipation décroît linéairement. De même, il apparaît que la dissipation de la variance de la température est proportionnelle à la profondeur élevée à une puissance légèrement supérieure à  $-4/3$ .

## Abstract

The physics of the water surface boundary layer determines to a large extent the exchange of momentum, heat and mass between the atmosphere and natural water bodies. In this work, the role of wind stress in relation to mixing in the surface boundary layer is quantified by considering surface waves, wave-current interactions and small-scale turbulent motion. This is achieved by focusing specifically on three aspects: 1) measurement and definition of the forcing (wind and waves); 2) acquisition of a large set of surface boundary layer turbulent kinetic energy dissipation data under different atmospheric conditions and 3) development of interrelationships between wind, waves and dissipation.

A temperature microstructure profiling system is presented which has been used to estimate dissipation in the surface boundary layer of lakes. Statistical tools to calculate the expected value and the confidence interval from a representative data set of dissipation values are described. In particular, the bootstrap technique for calculating confidence intervals for small data sets with intrinsically strong intermittency is presented.

This research is based mainly on 12 days of data collected during a field campaign carried out on Lake Neuchâtel in March 1996.

Using wind and wave data and by applying a one-dimensional model, it is shown how wind energy is transferred from the atmosphere to the water. Between 1.5% and 3.5% of the wind energy flux ( $:= \rho_{Air} C_D v_{10}^3$ ) is transferred to surface waves. For the fetch-limited basins of Lake Neuchâtel, a significant amount of that energy ( $\approx 50\%$ ) is transported horizontally to the shore. The remaining turbulent energy flux is available for mixing in the surface water column of the open water body.

The vertical momentum flux is the most relevant parameter for predicting the production of turbulent kinetic energy by Reynolds stress in the water column. Several points are important when calculating the stress on the surface and in the water surface boundary layer. Firstly, at low wind speeds ( $v_{10} < 4 \text{ ms}^{-1}$ ), the drag coefficient increases with decreasing wind speed. Secondly, the stability of the air overlying the water influences the drag coefficient. In a low wind speed regime with a stably stratified air column, the drag coefficient can be smaller by up to a factor of 2. If the air column is unstable, the drag coefficient can increase by up to 20%. Thirdly, due to the existence of the wave-induced stress, the Reynolds stress in the water column below the wave zone is up to 50% smaller than its atmospheric counterpart. This reduction in the turbulent stress is due to the horizontal export of momentum to the shore and to the acceleration of the not fully developed wave field.

Dissipation rates in the surface boundary layer scale with the cube of the wind speed within a factor of 3. By applying appropriate modifications to the parameterization of the friction velocity in water, the dissipation profiles below the wave-affected zone are correctly predicted by the law of the wall.

In the wave-affected layer (thickness:  $(2k)^{-1}$ , typically the uppermost meter in Lake Neuchâtel), individual dissipation estimates are larger by a factor of 3 to 10 than those predicted by the law of the wall. We show that these enhanced dissipation values are related

to two additional production terms. Firstly, energy input from wave breaking is shown to be of the same order of magnitude as the measured enhanced dissipation. Secondly, the interaction of Stokes drift with the turbulent stress results in an additional source of turbulent kinetic energy which is also of the same order of magnitude. The data do not allow us to conclude whether the observed enhancement in dissipation rates is due to the production of turbulent kinetic energy by wave breaking, by Stokes drift, or by a combination of both processes.

Based on limited measurements in the convective layer, it is suggested that below the Monin-Obukhov depth and within the free convection layer, dissipation decreases linearly with depth. On the other hand, the rate of diffusive smoothing is shown to scale with depth raised to a power slightly larger than  $-4/3$ .