

Les microstructures thermiques: Traceurs pour l'étude des turbulences et du brassage des eaux

Les variations de température les plus faibles enregistrées dans les eaux se produisent sur une distance de quelques fractions de millimètre. Ces variations, appelées microstructures thermiques, peuvent être utilisées comme traceurs pour l'étude des mélanges turbulents et de leur dynamique microspatiale. Cette méthode permet de faire la distinction entre les divers facteurs caractérisant le phénomène de brassage des eaux comme p.ex. l'effet du vent et celui du refroidissement.

Les méthodes classiques basées sur l'utilisation de traceurs sont conçues selon le principe suivant: l'évolution dans le temps de concentrations mesurées à différents endroits est révélatrice de la répartition et des taux de transformation des composés concernés. Dans les «eaux stagnantes», telles que les lacs, les mers et les estuaires, qui présentent presque toujours une stratification et des gradients de température bien marqués, les variations de température $\Delta T'$ (Fig. 1) peuvent être utilisées comme des traceurs naturels. Etant donné que la température se comporte de manière totalement conservative pendant un laps de temps allant de quelques secondes à quelques minutes, les variations $\Delta T'$ sont le reflet direct des déplacements turbulents de l'eau. Ces deux propriétés forment la base

de la méthode des microstructures thermiques qui a pour but de déterminer les taux de mélange à partir d'un grand nombre de mesures de $\Delta T'$. Lors du brassage des eaux, les écoulements turbulents se produisent surtout à l'horizontale, et les échanges verticaux sont fortement réduits. Mais même en direction verticale, le mélange turbulent est de cent à plusieurs millions de fois plus important que la diffusion moléculaire toujours présente (K_T ou K_S , Tab. 1). Etant donné que l'on quantifie les flux verticaux de matières, comme les flux moléculaires, par le produit de la diffusivité turbulente K_v ($m^2 s^{-1}$) et le gradient de concentration $\partial C/\partial z$ ($mol m^{-4}$, z = profondeur), la caractérisation de K_v revêt une importance pratique particulière.

Le principe

Quel rapport y a-t-il entre les microstructures thermiques et les taux de mélange des eaux? L'idée fondamentale de notre méthode est illustrée à la figure 1 en prenant comme exemple un profil thermique du Lac de Neuchâtel. Le long d'un gradient thermique $\partial T/\partial z$, les masses d'eau voisines présentent des températures différentes. Si elles viennent à être mélangées de manière turbulente, on assiste à des variations $\Delta T' \approx L' \cdot (\partial T/\partial z)$, où L' représente le déplacement d'une masse d'eau à partir de son point de repos. Si l'on parvient à mesurer *in situ* $\Delta T'$ et le gradient vertical $\partial T/\partial z$ avec une grande résolution, on obtient une estimation de l'expansion L' et de la fréquence des tourbillons (Fig. 1). Deux modèles statistiques différents (voir encadré) permettent de calculer les taux de mélange ($m^2 s^{-1}$) et la dissi-

pation d'énergie par turbulence ($W kg^{-1}$) à partir de ces deux valeurs [détails dans 1]. La taille des tourbillons peut varier, en fonction de l'état de stratification et de l'énergie disponible, de quelques millimètres à plusieurs mètres, comme on l'observe p.ex. dans l'océan ou dans le Lac Baïkal. Les variations qui se produisent sur une distance inférieure à 1 m sont appelées *microstructures thermiques*.

La mesure

Pour pouvoir caractériser les phénomènes de turbulence, il est primordial de déterminer les microstructures thermiques et de vitesse de déplacement avec une résolution de l'ordre du millimètre. En général, les profils sont établis à l'aide de sondes en descente ou en montée libre qui émettent vers un bateau ou bien même, aujourd'hui, à l'aide de sondes en dérivation libre dont les signaux sont captés par satellite. Pour remplir son rôle, la sonde doit se déplacer à une vitesse nettement supérieure à la vitesse turbulente w' (Tab. 1). L'inertie du détecteur thermique, qui est de l'ordre d'un centième de seconde, impose cependant une vitesse relativement faible. Une vitesse de déplacement de la sonde de l'ordre de 5 à 10 $cm s^{-1}$ représente un compromis acceptable qui permet de relever les profils verticaux de température avec une résolution de 0,5 à 1 mm env. Les détecteurs de température, qui ont des temps de réaction très courts, doivent impérativement être placés à la tête de la sonde pour obtenir un profil sans perturbations.

L'application

La diffusion turbulente dans les eaux stratifiées est un phénomène qui joue un rôle important dans divers domaines. Dans la mer, p.ex., elle influence de manière décisive le destin des gaz à effet de serre ainsi que les transports de chaleur entre l'équateur et les pôles. Dans les lacs, elle a un effet sur la répartition des nutriments et des polluants, sur la production d'algues, sur le transport d'oxygène et sur d'autres paramètres

Méthode du Nombre de Cox: Avec cette méthode, on compare les gradients des variations de température $\Delta T'$ (plus exactement $[\partial T'/\partial z]^2$) avec les gradients moyens $[\partial T/\partial z]^2$. Le rapport des deux grandeurs, appelé nombre de Cox, donne une indication de l'importance numérique des taux de brassage turbulent par rapport aux taux moléculaires (voir Tab. 1 pour les ordres de grandeur).

Méthode de dissipation: Ce procédé exploite l'information contenue dans la «finesse» de la structure des fluctuations de température existantes. Plus la turbulence est intense, plus la taille des tourbillons les plus petits sera faible avant qu'ils soient aplanis sous l'effet de la viscosité de l'eau. On peut déduire de ces mini-structures la dissipation d'énergie turbulente (Tab. 1). La dissipation est la mesure classique de l'intensité de la turbulence dans les systèmes naturels.

d'oxydoréduction et enfin sur la formation de sédiments. La détermination expérimentale de la diffusivité verticale dans les eaux naturelles est délicate. En effet, le mélange des eaux, qui s'effectue à l'encontre de la stratification due aux différences de densité, se produit lentement et présente une grande hétérogénéité spatiale et temporelle. Comme le montre la figure 1, on observe une alternance de zones turbulentes et de zones inactives.

En général, les taux de mélange vertical sont déterminés «indirectement» par la distribution temporelle d'un traceur donné ou sont déduits du bilan thermique. Pour ce faire, on considère cependant une moyenne de tous les mélanges turbulents auxquels le traceur a été soumis. La mesure indirecte ne permet pas d'identifier les zones particu-

| Symbole | Paramètres | Ordre de grandeur |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| $\Delta T'$ | Variations (locales) de température dans les eaux | de 0,0001 à 0,1 °C |
| K_v | Diffusivité turbulente verticale (Taux de brassage $K_v = w' \cdot L'$) | de 10^{-7} à 10^{-4} m ² s ⁻¹ |
| K_T | Diffusivité moléculaire de la température | $1,4 \cdot 10^{-7}$ m ² s ⁻¹ |
| K_S | Diffusivité moléculaire des matières dissoutes | de l'ordre de 10^{-9} m ² s ⁻¹ |
| L' | Hauteur des tourbillons | de qq cm à plusieurs m |
| w' | Vitesse verticale des tourbillons ($w' = (\epsilon/N)^{1/2}$) | de 0,01 à 10 cm s ⁻¹ |
| ϵ | Dissipation de l'énergie de turbulence sous forme de chaleur | de 10^{-11} à 10^{-6} W kg ⁻¹ |
| N^2 | Stabilité de la colonne d'eau ($N^2 = -1/\rho \cdot \partial \rho / \partial z$) | de 10^{-9} à 10^{-2} s ⁻² |

Tab. 1: Ordres de grandeur des paramètres caractéristiques de la turbulence dans des eaux stratifiées.

lièrement turbulentes ou inactives ou même de déterminer l'intensité du brassage à un endroit ou à un moment donné. La mesure directe par la méthode des microstructures thermiques permet par contre de caractériser les phénomènes de turbulence et de

distinguer dans leur étude la composante temporelle et la composante spatiale. Cette méthode a par exemple permis de déterminer le rôle de la couche limite du sol dans le brassage turbulent au sein de l'hypolimnion de lacs de petite à moyenne dimension (Fig. 2) [2]. Des mesures effectuées dans le Lac Baïkal [3] et dans les mers latérales montrent que, même dans les grandes masses d'eau, le brassage vertical dépend largement de processus ayant lieu dans les sédiments.

Notre méthode permet de plus d'étudier les phénomènes de turbulence dans diverses conditions physiques prises séparément. Il devient possible de paramétriser correctement divers processus physiques de brassage dans les modèles et de déterminer les diverses voies et les temps de séjour de l'énergie mécanique. On est ainsi en mesure de faire p. ex. la distinction entre l'effet du vent et celui du refroidissement, ce qui est pratiquement impossible avec des traceurs classiques.

Cette étude a bénéficié du soutien du Fonds National Suisse et de l'EAWAG.



Alfred Wüest, physicien, dirige la division «Écologie aquatique appliquée». Il enseigne la «Physique aquatique» à l'EPF de Zurich. Domaines de recherche: Processus de brassage dans les lacs et les rivières, influence des processus physiques sur les cycles biogéochimiques des eaux.

Coauteurs: Tobias Jonas, Andreas Lorke, Michael Schurter

- [1] Gloor M., Kocsis O., Omlin M., Schurter M., Wüest A. (1995): Temperaturmikrostrukturen – Eine Methode zur Bestimmung der Mischungsintensität in geschichteten Gewässern. Gas Wasser Abwasser 75, 1087–1096.
- [2] Wüest A., Piepke G., van Senden D.C. (2000): Turbulent kinetic energy balance as a tool for estimating vertical diffusivity in wind-forced stratified waters. Limnology & Oceanography 45, 1388–1400.
- [3] Ravens T.M., Kocsis O., Wüest A., Granin N. (2000): Small-scale turbulence and vertical mixing in Lake Baikal. Limnology & Oceanography 45, 159–173.

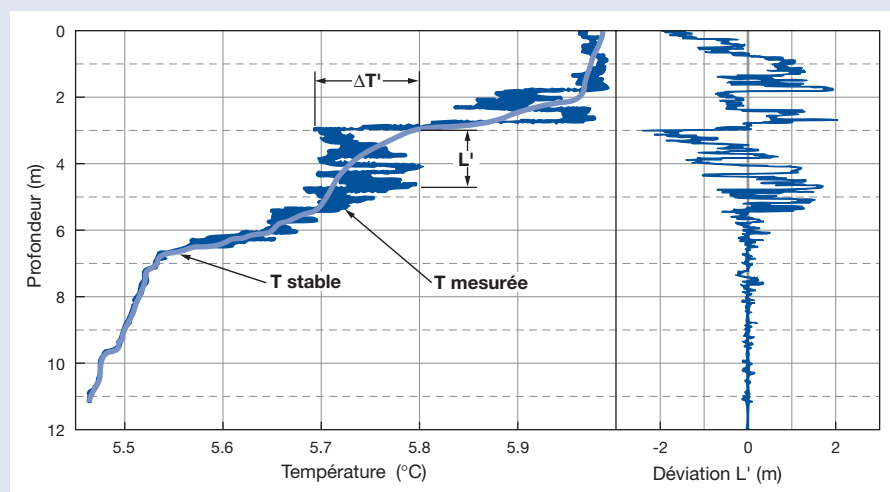


Fig. 1: Profil de température du Lac de Neuchâtel (à gauche, T mesurée) et déviation correspondante L' (à droite). Les déviations L' peuvent atteindre des écarts allant jusqu'à 2 m par rapport à la position de repos dans les zones stables (non turbulentes) (à gauche, T stable). Les variations de température $\Delta T'$ sont le résultat du tourbillonnement de petites masses d'eau voisines ayant des températures différentes.

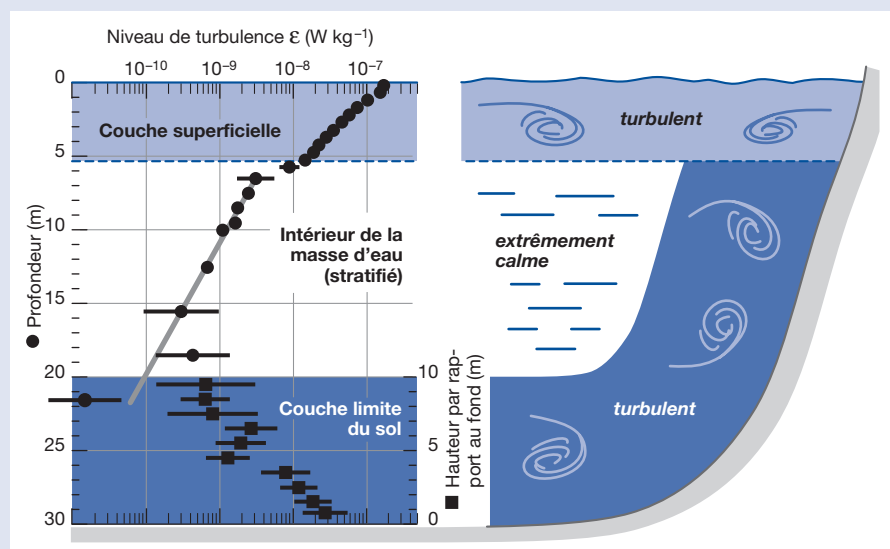


Fig. 2: Profil de turbulence caractéristique d'un lac (ici l'Alpnachersee). A la surface, le vent et le refroidissement de l'eau se traduisent directement par une énergie de turbulence. Cette énergie diminue avec la profondeur et est également atténuée par la stratification. Le centre de la masse d'eau est donc extrêmement calme. A proximité du fond, le niveau de turbulence augmente à nouveau sous l'effet des frottements.