HAL
open science

The stability of the water column in French ponds (Limousin region) by the calculation of the Wedderburn number

Laurent Touchart, Abdelhamid Azaroual, Rachid Nedjaï, Pascal Bartout, Mohammad Aldomany, Camille Millot

To cite this version:

Laurent Touchart, Abdelhamid Azaroual, Rachid Nedjaï, Pascal Bartout, Mohammad Aldomany, et al.. The stability of the water column in French ponds (Limousin region) by the calculation of the Wedderburn number. The International Conference Air and Water - Components of the environment, Universitatea Babeș-Bolyai și Administrația Bazinală de Apă Someș-Tisa, Mar 2014, Cluj-Napoca, Romania. pp.8-15. hal-02095316

HAL Id: hal-02095316

https://univ-orleans.hal.science/hal-02095316

Submitted on 25 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Touchart L., Azaroual A., Nedjai R., Bartout P., Aldomany M., Millot C. (2014) « The stability of the water column in French ponds (Limousin region) by the calculation of the Wedderburn number » Conference dedicated to the World Meterological Day and the World Water Day, March 21-22, 2014, Universitatea Babeş-Bolyai şi Administraţia Bazinală de Apă Someş-Tisa. Proceedings *in* Pandi G. and Moldovan F., Ed., *Air and water components of the environment*. Cluj-Napoca, Casa Cărţii de Stinţă, 484 p. : 8-15. (ISSN 2067-743X).

Version HAL comprenant une version non paginée de l'article anglais initial (publié en 2014) et une version française inédite (traduction L. Touchart, mars 2021).

THE STABILITY OF THE WATER COLUMN IN FRENCH PONDS (LIMOUSIN REGION) BY THE CALCULATION OF THE WEDDERBURN NUMBER

Laurent TOUCHART[1], Abdelhamid AZAROUAL[2], Rachid NEDJAI[3], Pascal BARTOUT[4], Mohammad ALDOMANY[5], Camille MILLOT[6]

ABSTRACT. The stability of the water column in French ponds (Region Limousin) by the calculation of the Wedderburn number.
Oxygenation and biological life in lakes, reservoirs and ponds depend on the stability of the water column and on the rhythms of stratification and mixing periods. Slight thermal stratification in ponds often is regarded as the same as instability in shallow lakes. Nevertheless fetch in ponds is very short, what reduces the mixing. Wedderburn number (quotient of the buoyancy by the mixing) is used to quantify the stability in shallow water bodies. We calculate it for some ponds in French region Limousin, due to original hourly water temperature measurements in all depths and wind data of Météofrance stations. First results show that very high values (above 10) are frequent in summer and spring period (during 41 % of the total time of 2 336 hours from May to July in three ponds). That is why we may consider Limousin ponds as stable stratified bodies of water despite their shallowness. Continuous measurements allow to calculate the diurnal cycle and other time scales of the Wedderburn number, with periods of weakening, when air temperatures and surface water temperatures decrease, wind speed increases and when the wind blows in the same direction with the length of the pond. The most complex variable is the depth of the thermocline; a light increase of the breeze thickens the upper warm layer and strengthens the stability, but an important increase of the wind tends to destroy the stratification.

Key-words: “pond”, “water temperature”, “buoyancy”, “mixed layer”.

1. INTRODUCTION AND STUDY SITE: THE IMPORTANCE OF THE STABILITY OF PONDS FOR THE LAND MANAGEMENT

The concept of “thermal resistance to mixture” in a lake was at first brought up by E. Birge (1910, p. 989). Then Wilhelm Schmidt (1915, 1928) defined the stability of a lake as the quantity of work (in the sense of mechanical energy) necessary to mix the entire water column of a lake and to homogenize the temperature profile, still keeping the same heat. The Austrian scientist gave the first mathematical equations for calculating the stability of a freshwater lake in ergs (ten millions Joules) per unit area. The calculation has been complicated by O.

[1] Professor, Laboratory of Geography EA 1210 Cedete, University of Orleans, 10 rue de Tours, 45 065 Orléans Cedex 2 (France). laurent.touchart@univ-orleans.fr
[2] Doctoral student. abdelhamid.azaroual@etu.univ-orleans.fr
[3] Professor. rachid.nedjai@univ-orleans.fr
[4] Senior lecturer. pascal.bartout@univ-orleans.fr
[5] Doctoral student. mohammad.al-domany@etu.univ-orleans.fr
[6] Doctoral student. camille.millot@etu.univ-orleans.fr

Eckel (1950). W.H. Munk and E.R. Anderson (1948) suggested transforming potential in effective stability, which would be later the way to the creation of the Richardson number. They separated the mixed layer of a lake, due to the process of free convection, and the wind stirred layer, due to the process of forced convection.

But some limnologists noted that there is an original stability within the epilimnetic layer of a lake, i.e. above the parent-thermocline (Horne & Goldman, 1994). The epilimnion consists in a succession of small mixed layers, wind-stirred layers, diurnal thermoclines and temporary thermoclines. The Wedderburn number (W) has been established by R.O. Thompson and J. Imberger (1980) and used in order to quantify the stability within the epilimnion and to enter simplified numerical data in one-dimensional thermal and density computer models (Patterson *et al*., 1984, Imberger, 1985). Several authors used W to predict internal waves too (Boegman *et al*., 2005). Some geographers affirm that a pond is a truncated lake, with a water column reduced to the epilimnion and a surface reduced to the littoral zone (Loup, 1974). The authors of the present paper do not agree with this hypothesis (Touchart, 2007), because the bottom of a pond is not equivalent to a parent-thermocline and because the fetch is very short compared to a lake. Moreover E. Gorham and F.M. Boyce (1989) showed that the depth of the parent-thermocline increases with the area of the lake. That is why it is interesting to test W in small and shallow bodies of water (Gorbunov, 2007), especially for checking the specificity of ponds (Touchart, 2002).

Deep layer oxygenation, mineralization in bottom mud, density currents and water movements, plankton oscillations depend on the stability modifications in the water column of the ponds. In headwater regions where the hydrographic network is dammed by thousands ponds, such as Limousin, the estimation of mixing rhythms and stratification stability should be of outstanding importance for regional land management and for choosing water evacuation systems, monks, spillways, weirs, deep sluice gates, derivation channels and other arrangements in the dam of ponds.

In France, where the average size of the 251.289 ponds is 1.05 ha (data 2007, P. Bartout, first published in Touchart *et al*., 2012), and still more in region Limousin, where the average size of the 16 971 ponds is 0.6 ha (Bartout, 2010, 2012), ponds usually are very small. But we intentionally selected large ponds, where fetch and mixing will develop maximum values, so that W will be at the minimum. Then the stability may be regarded as a bottom-value for ponds in general. Cieux' area is about 40 ha, Pouge's 30 ha, Oussines' 15 ha and their respective depth is 3.7 m, 5.6 m and 2.4 m.

2. METHODS: CONTINUOUS MEASUREMENTS OF WATER TEMPERATURE AND CALCULATION OF WEDDERBURN NUMBER

According to R.O. Thompson and J. Imberger (1980), W is the ratio of the buoyancy (product of the reduced gravitational acceleration due to the density across the thermocline with the squared thickness of the mixed layer) by the mixing (product of the fetch with the squared surface friction velocity). We use the

Markofsky and Harleman's formula (1971) for calculating the density of the freshwater ponds from the water temperature. We assimilate the temperature of the mixed layer above thermocline to thus of the thermometer located at a depth of 25 cm, and the temperature of the deep layer to thus of the deepest thermometer. For estimating the thickness of the mixed layer, we calculate the temperature gradient between each thermometer and we select the highest value of all the segments, except if this number is located above 75 cm because we consider in such a case that it corresponds to a temporary surface thermocline. For calculating the characteristic shear velocity we multiply the wind velocity (at 10 meters high) by a coefficient of $1.3\ 10^{-3}$ (Salençon & Thébault, 1997). We assimilate the fetch to the length from the buoy to the shoreline from where blows the hourly wind.

Based data are water temperature one (data L. Touchart) and meteorological one (data Météofrance). The water temperature is measured by recording thermometers with an internal piezoelectric sensor. The precision is within 0.2 °C. L. Touchart directly calibrates (by the means a resistance thermometer with a 4 wire platinum 100 sensor), sets up, maintains and takes measurements. All thermometers are padlocked on a galvanised chain buoyed every 20 or 25 cm down to 2 m depth and then every meter down to the bottom. Our hourly water temperatures within ponds represent about 300 000 data. Only a selection of 2 336 data is used here.

3. RESULTS: A VERY HIGH STABILITY DURING 40 % OF THE SUMMER TIME

3.1. At long-time scale

Taking one year with another the stratification of Limousin ponds is about six months long, from the end of April to October (Touchart, 2002). Some monthly examples may illustrate the duration of the stability.

In the pond Pouge, the water temperatures are registered above the central plain, 90 m south of the dam, in a water column of about 5.0 m depth. Meteorological data are Limoges-Bellegarde's airport ones. According to the narrow extension of the pond, the maximum fetch (more than 1 900 m) happens when the wind blows from the south, but values sharply fall when the wind deviates from this direction. From the 1st to the 31st of July 2000, during the heart of the warm season, the average value of W is equal to 38.7. W is above 10 (very high stability) during 59.1 % of the 744 hours, between 3 and 10 (rather high stability) during 27.6 %, between 1 and 3 (slight stability) during 11.0 %. It means that the deepest pond of our sample during the warmest month is not stable only during 9.5 % of the time (W below 1).

In the Great Pond Cieux, the buoyed chain registers the temperatures above the central deep area, 300 m north-east of the dam, in a water column of about 3.0 m depth. Meteorological data are Limoges-Bellegarde's airport ones. According to the multilobate shape of the pond, the maximum fetch happens if the wind blows from the north-east, but many other directions make great lengths (1 000 m N, 860

m NNE, 430 m ENE, 330 m WSW, etc.). From the 1st to the 17th of June 2002, i.e. during 398 hours, the average value of W is equal to 11.7. W is above 10 during 29.1 % of the total time, between 3 and 10 during 22.9 %, between 1 and 3 during 20.8 %. It means that the pond is not stable during 27.1 % of the time (W below 1).

Pond Oussines, representative of Limousin Highlands' water bodies, is located at an altitude of 836 m. Our buoyed chain registers the temperatures above the central deep area, 120 m north-east of the dam, in a water column of 1.8 m depth. Meteorological data are Ussel-les-Plaines' station ones, at an altitude of 670 m, where high winds often blow. According to the extension of the pond and its knee shape, the maximum fetch (more than 600 m) happens for a south-east wind. From the 1st to the 31st of May 2002, during the beginning of the warm season, the average value of W is equal to 9.8. W is above 10 during 28.6 % of the 744 hours, between 3 and 10 during 22.4 %, between 1 and 3 during 14.8 %. From the 1st to the 19th of June 2002, during 450 hours, the average value of W is equal to 33.0. W is above 10 during 52.9 % of the total time, between 3 and 10 during 18.4 %, between 1 and 3 during 14.0 %. It means that the shallowest pond on the highest and windiest highland is not stable (W below 1) during 34.1 % of the time in May and only 14.2 % in June. The comparison between Cieux and Oussines seems to show that the pond area is a more important criterion than the altitude. The smallest is the pond, the greatest is W.

If we add the 2 336 hours from May to July in the three ponds, W is above 10 during 40.9 % the total time, between 3 and 10 during 23.4 %, between 1 and 3 during 14.6 %, below 1 during 21.1 %.

3.2. At short-time scale

A focus on a representative example (Great Pond Cieux, 6-7th June 2002) allows to compare the evolution of temperature profiles, density gap, buoyancy, mixing and Wedderburn number during a diurnal cycle.

At 19 h (17 h UTC), the temperature profile is significant of the evening during a sunny day of the end of the spring. Water is warm near the surface and cold near the bottom, so that the stratification is sharp, with a gradient of 1.8°C.m^{-1} in the mid-layer. A rather high wind during several hours in the afternoon has homogenized an epistagnion of about 80 cm thick, and the profile is convexo-concave. The density gap between epi- and hypostagnion is sharp, but buoyancy remains rather low, since thermocline is not deep. This situation continues to 23 h, with a very moderate evolution: the profile grows colder parallel to itself due to thermal convection, from which a decrease of the buoyancy. The rather high wind of the afternoon (until to 19 h) causes a rather strong mixing and a low W.

At 0 h (22 h UTC), free convection goes on decreasing surface and subsurface temperatures, while a slight forced convection makes the profile convex, from which a sudden increase of the buoyancy. But due to a rather high wind, mixing is strong and the Wedderburn number, although it increases, does not reach 5.

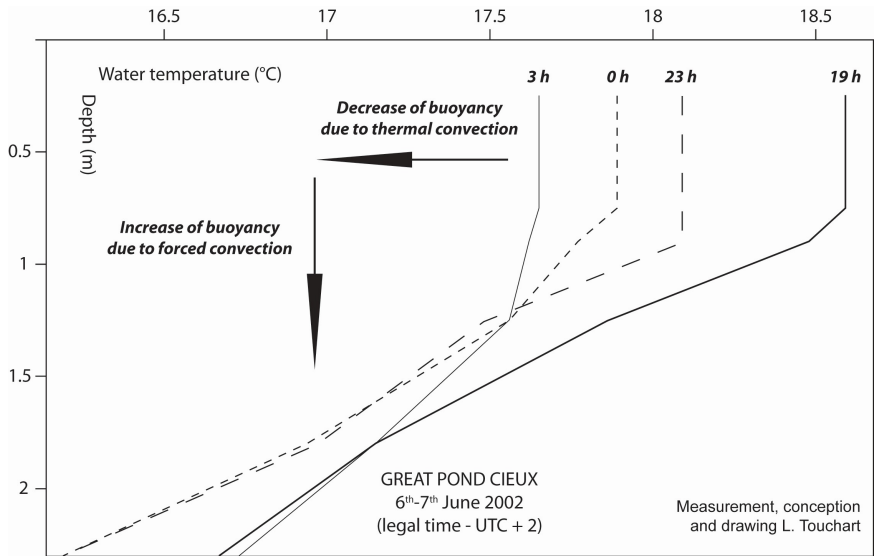

Fig. 1. ***Temperature profiles during night cooling in Great pond Cieux (6-7th June 2002)***

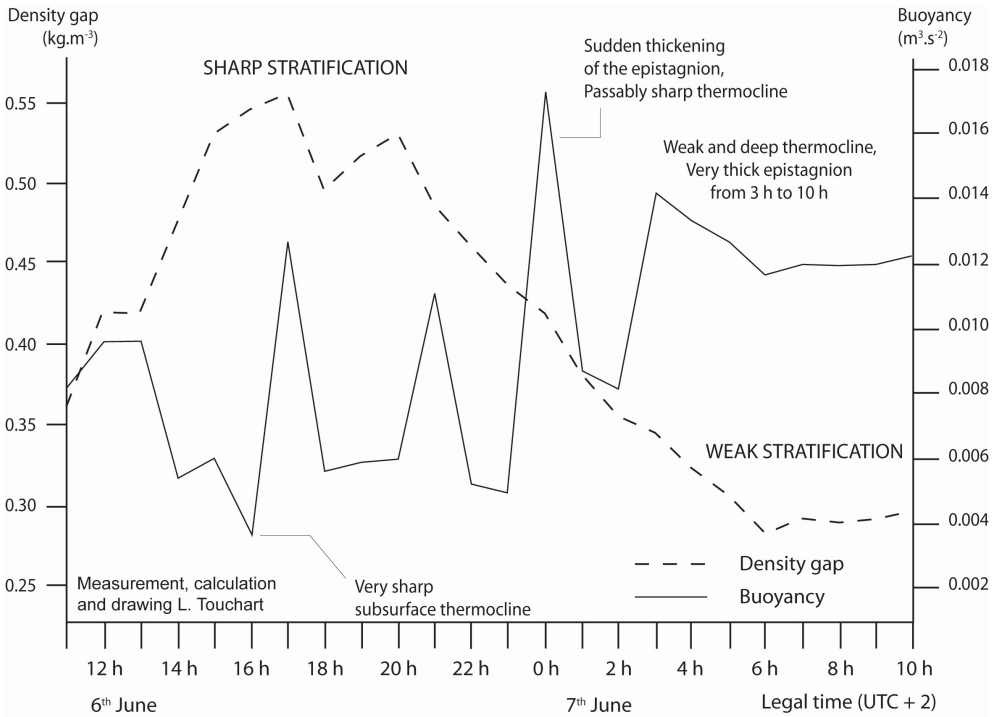

Fig. 2. ***Hourly evolution of density gap and buoyancy in Great pond Cieux (6-7th June 2002)***

At 3 h (1 h UTC), after the wind has dropped, thermal convection becomes the exclusive process and weakens the temperature gradient. But thermocline remains in deep layers, so that buoyancy, though decreasing, keeps high values. Since the weather is still, mixing is almost absent and W goes beyond 11, the maximum value during this diurnal cycle. This situation continues just as it is during the rest of the night and in the early morning.

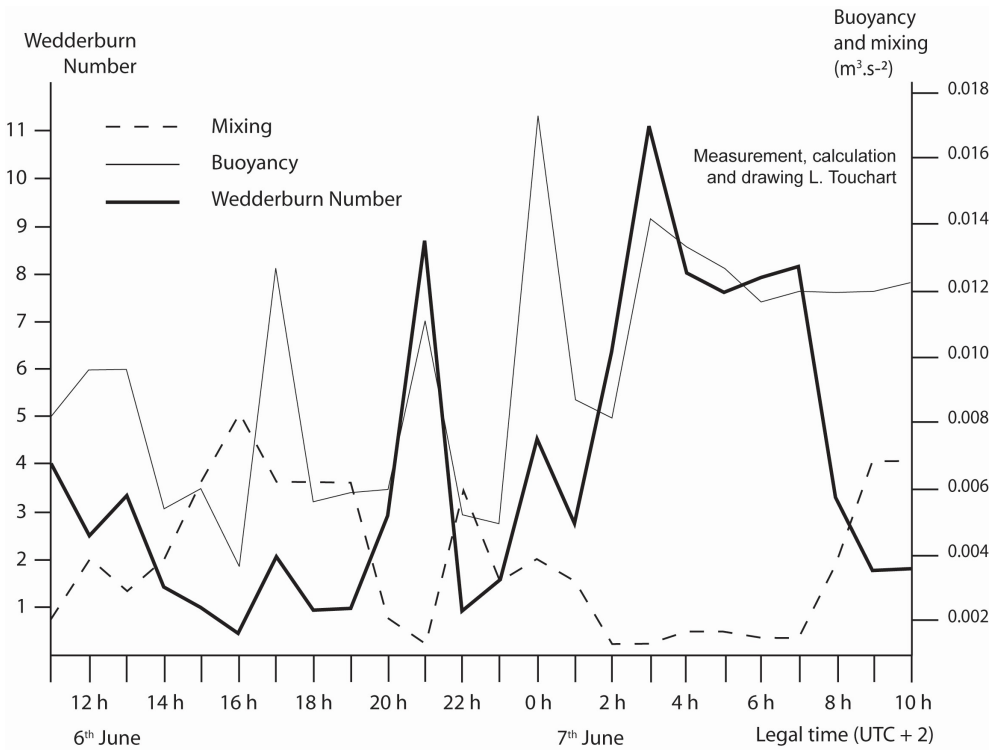

Fig. 3. ***Hourly evolution of buoyancy, mixing and Wedderburn number in Great pond Cieux (6-7th June 2002)***

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS: A DURABLE STABILITY IN PONDS DEEPER THAN 2 METERS

Our research shows that the stability of ponds deeper than 1.8 m, quantified by W, is more durable than it is usually said in the bibliography about stratification in Limousin ponds (Combrouze, 2000, according manual punctual measurements) or in shallow reservoirs and ponds in other countries (Krambeck *et al*., 1994, long-term stratification only above 4 m depth deeper for Israeli reservoirs). Our study even lowers the minimum-depth of 2 m for stability of small water bodies with area less than 100 ha, measured and calculated by M. Gorbunov (2007) in Russian ponds. In studied Limousin ponds deeper than 1.8 m, the Wedderburn number is

above 1 during 79 % of the total time of the warm season (spring and summer). During 41 % of the time, thermocline may be assimilated to a horizontal plan and simple density models may be used to predict how operate ponds. Small area added to relatively great depth and, in some cases, by narrow extension along a dammed embanked valley is in favour of high stability of Limousin ponds. The ponds with such a size (0.1-100 ha; 1-6 m) should be regarded as specific water bodies for land management.

Our hourly study shows that a moderate wind increases W, but a high one decreases W. It confirms the fact according which a breeze makes the thermocline deeper, but a stiff wind destroys it. Horne and Goldman (1994) had noted this process in lake epilimnion.

But we shall admit that interpretation of W is difficult and not always fit for a geographical way. The calculation is initially made to put mathematical models reducing the epilimnion thermocline to a plan and lake to a rectangular basin (Shintani *et al*., 2010). If it is used in another aim, some biases may appear. For example the transformation of a convexo-concave to a convex profile causes a high increase of buoyancy, even if the profile has not changed by forced convection, but only by free convection within the margin of error of the thermometer and of the extrapolation curve between two instruments. The profile of 7th of June 2002 at 22 h UTC in the Pond Cieux may be regarded as such a case.

However that may be, the stability in French Midwest's ponds is high and thermal stratification is very more durable than a daily subsurface thermocline in the epilimnion of a lake or a deep reservoir, although it is obviously less durable than a seasonal parent-thermocline. That is why we suggested in previous publications (Touchart, 2002) to name "epistagnion" such an upper pond mixed layer, which the foot is limited by a discontinuity layer including a mid-stable thermocline during several days or weeks.

References

1. Bartout P. (2010) *Pour un référentiel des zones humides intérieures de milieu tempéré : l'exemple des étangs en Limousin (France).* Sarrebruck, Editions Universitaires Européennes, 464 p.
2. Bartout P. (2012) *Les étangs du Limousin, des zones humides face au développement durable*. Brive-la-Gaillarde, Les Monédières, 294 p.
3. Birge E. (1910) « An unregarded factor in lake temperatures » *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts and Letters*, 16: 989-1004.
4. Boegman G., Ivey N. & Imberger J. (2005) "The energetics of large-scale internal wave degeneration in lakes" *Journal of Fluid Mechanics*, 531: 159-180.
5. Combrouze P. (2000) "Lacs et étangs" *in* Fortin F. & Boeufgras J., *Le Limousin côté nature*. Saint-Gence, Espaces Naturels du Limousin, 216 p. : 34-36.
6. Eckel O. (1950) „Über die nümerische und graphische Ermittlung der Stabilität von Gewässern nach W. Schmidt" *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 12 : 38-46.

7. Gorbunov M.Ju. (2007) „Vertikal'naja stratifikacija vodnyh mass v malyh ozerah lesostepnogo Povolž'ja“ *Izvestija Samarskogo naučnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 9(4): 973-986.
8. Gorham E. & Boyce F.M. (1989) “Influence of lake surface area and depth upon thermal stratification and the depth of the summer thermocline” *Journal of Great Lakes Research*, 15: 233-245.
9. Horne A.J. & Goldman C.R. (1994) “Heating and cooling in the epilimnion and mixed layers” in *Limnology*. New York, McGraw-Hill, 576 p.: 57-62.
10. Imberger J. (1985) „The diurnal mixed layer“ *Limnology and Oceanography*, 30(4): 737-770.
11. Krambeck H.J., Milstein A. & Zoran M. (1994) „Physical limnology of reservoirs in Israel used for crop irrigation and fish farming” *Verhandlungen Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limonologie*, 25: 1373-1378.
12. Loup J. (1974) « Les lacs » in *Les eaux terrestres, hydrologie continentale*. Paris, Masson, 174 p. : 32-42.
13. Markofsky M. & Harleman D.R.F. (1971) *A predictive model for thermal and water quality reservoirs*. Boston, MIT Hydrodynamics Laboratory, Technical Report n° 134, 283 p.
14. Munk W.H. & Anderson E.R. (1948) „Notes on a theory of the thermocline“ *Journal of Marine Research*, 7 : 276-295.
15. Patterson J.C., Hamblin P.F. & Imberger J. (1984) “Classification and dynamic simulation of the vertical density structure of lakes” *Limnology and Oceanography*, 29(4): 845-861.
16. Salençon M.J. & Thébault J.-M. (1997) *Modélisation d'écosystème lacustre, application à la retenue de Pareloup (Aveyron)*. Paris, Masson, 183 p.
17. Schmidt W. (1915) « Über der Energiegehalt der Seen. Mit Beispielen vom Lunzer Untersee nach Messungen mit einen einfachen Temperaturlot » *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, Suppl., 6: 1-25.
18. Schmidt W. (1928) „Über die Temperatur- und Stabilitätverhältnisse von Seen“ *Geografiska Annaler*, 10(1/2): 145-177.
19. Shintani T., Fuente A. De la, Niño Y. & Imberger J. (2010) “Generalizations of the Wedderburn number: parameterizing upwelling in stratified lakes” *Limnology and Oceanography*, 55(3): 1377-1389.
20. Thompson R.O. & J. Imberger (1980) “Response of a numerical model of a stratified lake to wind stress” *in* Carstens T. & McClimans T.A., *Second International Symposium on Stratified flows*. Trondheim, Tapir, vol. I : 562-570.
21. Touchart L. (2002) *Limnologie physique et dynamique, une géographie des lacs et des étangs*. Paris, L'Harmattan, 396 p.
22. Touchart L. (2007) « La définition de l'étang en géographie limnologique » in *Géographie de l'étang, des théories globales aux pratiques locales*. Paris, L'Harmattan, 228 p. : 13-53.
23. Touchart L., Bartout P., Azaroual A. (2012) « The influence of ponds on dissolved oxygen in small rivers of Berry (France) » Conference dedicated to the World Meterological Day and the World Water Day, March 23-24, 2012, Universitatea Babeş-Bolyai şi Administraţia Bazinală de Apă Someş-Tisa. Proceedings *in* Pandi G. and Moldovan F., Ed., *Air and water components of the environment*. Cluj-Napoca, Presa Universitară Clujeană, 550 p.: 17-24.

LA STABILITE DE LA COLONNE D'EAU DANS LES ETANGS FRANÇAIS (REGION LIMOUSIN) PAR LE CALCUL DU NOMBRE DE WEDDERBURN

Laurent TOUCHART, Abdelhamid AZAROUAL, Rachid NEDJAI, Pascal BARTOUT, Mohammad ALDOMANY, Camille MILLOT

Résumé : La stabilité de la colonne d'eau des étangs français (région Limousin) par le calcul du Nombre de Wedderburn

L'oxygénation et la vie biologique des lacs naturels, des lacs de barrage et des étangs dépendent des caractéristiques de stabilité de la colonne d'eau, c'est-à-dire des rythmes faisant alterner les périodes de stratification et de mélange. La fragile stratification thermique des étangs est souvent considérée dans la littérature scientifique comme équivalente à l'instabilité des lacs peu profonds. Néanmoins, le fetch (course du vent) sur les étangs est très court, ce qui réduit les possibilités de brassage. Le Nombre de Wedderburn (quotient de la flottabilité par la possibilité de brassage) est employé pour quantifier la stabilité dans les plans d'eau pelliculaires. Nous l'avons calculé dans plusieurs étangs limousins, à partir de nos mesures inédites de température horaire de l'eau à toutes les profondeurs et des données de vent des stations Météofrance. Les premiers résultats montrent que des valeurs très élevées (supérieures à 10) sont fréquentes en période estivale et au printemps (pendant 41% du temps total de 2 336 heures allant de mai à juillet dans les trois grands étangs de la Pouge, de Cieux et des Oussines). Ainsi, malgré leur faible profondeur absolue, on peut considérer que, en saison chaude, les étangs limousins se conduisent comme des plans d'eau stratifiés stables. Les mesures en continu permettent aussi de calculer le Nombre de Wedderburn à l'échelle du cycle diurne. En général le Nombre baisse, quand les températures de l'air et des eaux de surface diminuent, la vitesse du vent augmente et le vent souffle dans le même sens que la longueur de l'étang. La profondeur de la thermocline forme une variable complexe : une légère augmentation de la brise épaissit la couche chaude supérieure et renforce la stabilité, mais une augmentation importante du vent tend à détruire la stratification.

Mots clefs : « étang », « température de l'eau », « flottabilité », « couche de brassage ».

1. Introduction et site d'étude : de l'importance de connaître la stabilité des étangs pour l'aménagement du territoire

Le concept de « résistance thermique au brassage » dans un lac avait déjà été évoqué par E. Birge (1910, p. 989). Puis Wilhelm Schmidt (1915, 1928) avait défini la stabilité d'un lac comme la quantité de travail (au sens d'énergie mécanique) nécessaire pour brasser toute la colonne d'eau d'un lac et homogénéiser son profil vertical de température, tout en conservant la même chaleur. Le scientifique autrichien avait donné les premières équations mathématiques permettant de calculer la stabilité d'un lac d'eau douce en ergs (dix millions de joules) par unité de surface. Le calcul a ensuite été compliqué par O. Eckel (1950). W.H. Munk et E.R. Anderson (1948) avaient suggéré de transformer

la stabilité potentielle en stabilité effective, ce qui ouvrait la voie à la création ultérieure du Nombre de Richardson. Ils distinguaient ce que nous pourrions appeler ici en français la couche de mélange libre d'un lac, due au processus de convection thermique, et la couche de brassage forcé, due au processus de convection mécanique.

Plus récemment, certains limnologues ont émis l'idée qu'il existait une stabilité originale, particulière, au sein même de la couche épilimnique d'un lac, c'est-à-dire au-dessus de la thermocline-mère (Horne & Goldman, 1994). Dans cette hypothèse, l'épilimnion consiste en fait en une succession de petites couches de mélange libre, de petites couches de brassage forcé, de thermoclines quotidiennes (durant quelques heures) et de thermoclines temporaires (durant quelques jours). Quant au Nombre de Wedderburn (W), il a été établi en limnologie par R.O. Thompson et J. Imberger (1980) pour quantifier la stabilité au sein de l'épilimnion et pour entrer des données numériques simplifiées dans des modèles informatiques unidimensionnels de température et de densité (Patterson et al., 1984, Imberger, 1985). Plusieurs auteurs ont également utilisé le Nombre de Wedderburn pour prédire les ondes internes (Boegman *et al*., 2005).

Il se trouve que certains géographes affirment qu'un étang fonctionne comme un lac tronqué, dont la colonne d'eau est réduite à l'épilimnion et dont la surface est réduite à la zone littorale (Loup, 1974). Les auteurs du présent article ne sont pas d'accord avec cette hypothèse (Touchart, 2007), faisant valoir d'une part que le plafond d'un étang n'est pas l'équivalent d'une thermocline-mère, d'autre part que le fetch d'un étang est très court par rapport à celui d'un lac. En outre, E. Gorham et F.M. Boyce (1989) ont montré que la profondeur de la thermocline-mère augmentait avec la superficie du lac. C'est pourquoi il semble intéressant de calculer le Nombre de Wedderburn dans des plans d'eau de petites dimensions, tant en superficie qu'en profondeur (Gorbunov, 2007), cette opération permettant de confirmer l'originalité du fonctionnement des étangs par rapport à celui des épilimnions en lac (Touchart, 2002).

L'oxygénation des couches profondes, les processus de minéralisation dans les sédiments de fond, les courants de densité, ou encore les oscillations du plancton dépendent des modifications de la stabilité qui surviennent dans la colonne d'eau des étangs. Dans les régions de tête de bassin où le réseau hydrographique est barré par des milliers d'étangs, comme c'est le cas du Limousin, l'estimation des rythmes selon lesquels se succèdent les périodes de brassage et celles de stabilité de la stratification devrait être une priorité pour la bonne gestion des territoires, afin d'effectuer les choix les plus adaptés concernant les systèmes d'évacuation des eaux, les moines, les déversoirs, les canaux de dérivation et autres aménagements hydrauliques des étangs.

En France, où la taille moyenne des 251 289 étangs est de 1,05 ha (données 2007, P. Bartout, initialement publiées *in* Touchart *et al*., 2012), et plus encore en Limousin, où la taille moyenne des 16 971 étangs est 0,6 ha (Bartout, 2010, 2012), les étangs sont généralement très petits. Mais nous avons intentionnellement sélectionné de grands étangs, où tant le fetch (la course du vent) que le brassage

développent des valeurs maximales en dénominateur, de sorte que le Nombre de Wedderburn sera au minimum. La stabilité ainsi quantifiée pourra être considérée comme une valeur-plancher pour les étangs limousins en général. Pour ce qui est des trois étangs sélectionnés, la superficie du Grand Étang de Cieux est d'environ 40 ha, celle de l'étang de la Pouge de 30 ha, celle de l'étang des Oussines de 15 ha, cependant que leur profondeur respective est de 3,7 m, 5,6 m et 2,4 m.

2. Une méthodologie fondée sur des mesures en continu de la température de l'eau et le calcul du Nombre de Wedderburn

Selon R.O. Thompson et J. Imberger (1980), le Nombre de Wedderburn est, en limnologie, le quotient de la flottabilité (elle-même étant le produit de l'accélération de la pesanteur réduite au saut de densité à travers la thermocline par le carré de l'épaisseur au carré de la couche de mélange) par la potentialité de brassage (qui est le produit du fetch par le carré de la vitesse de frottement du vent à la surface du plan d'eau). Nous utilisons la formule de Markofsky et Harleman (1971) pour calculer la densité des étangs d'eau douce à partir de la température de l'eau. Nous assimilons la température de la couche de mélange située au-dessus de la thermocline à celle du thermomètre situé à une profondeur de 25 cm, et la température de la couche profonde à celle du thermomètre le plus profond. Pour estimer l'épaisseur de la couche de mélange, nous calculons le gradient de température entre chaque thermomètre (quotient de l'écart de température par l'écart de profondeur) et sélectionnons la valeur la plus élevée de tous les segments, sauf si ce nombre est situé au-dessus de 75 cm (on considère dans un tel cas qu'il correspond à une thermocline temporaire de surface). Pour calculer la vitesse de cisaillement caractéristique, nous multiplions la vitesse du vent prise à 10 mètres de hauteur par le coefficient de $1{,}3.10^{-3}$ préconisé par Salençon et Thébault (1997). Le fetch est ici assimilé à la distance séparant la bouée du point du trait de côte d'où souffle le vent ; cette distance est calculée pour chaque donnée horaire.

Les données brutes sont constituées de températures de l'eau inédites (données L. Touchart) et de vitesses et directions de vent (données Météofrance). La température de l'eau est mesurée au moyen de thermomètres à résistance enregistreurs à sonde interne. Leur précision est de 0,2 °C. L'étalonnage (par le biais d'un thermomètre à résistance de platine 100, de haute précision, à capteur 4 fils), la mise en place, la maintenance et le déchargement des données sur le terrain ont été directement effectués par L. Touchart. Tous les thermomètres sont cadenassés sur une chaîne de bouée galvanisée tous les 20 ou 25 cm (selon les étangs) jusqu'à 2 m de profondeur, puis tous les mètres en dessous. Les températures horaires de l'eau dans les étangs limousins étudiés représentent environ 300 000 données. Seule une sélection de 2 336 données est utilisée ici.

3. Résultats : une stabilité très élevée pendant 40 % du temps estival

3.1. A longue échelle de temps

L'exploitation des données de plusieurs années consécutives (de 1998 à 2002) montre que la stratification des étangs limousins étudiés reste en place pendant six mois chaque année (Touchart, 2002). Quelques exemples illustrant cette stabilité peuvent être pris à l'échelle mensuelle.

Dans l'étang du Pouge, les températures de l'eau sont enregistrées au-dessus de la plaine centrale, à 90 m au sud de la chaussée, sur une tranche d'eau d'environ 5,0 m. Les données météorologiques sont celles de la station Météofrance de l'aéroport de Limoges-Bellegarde. Du fait du caractère très oblong de l'étang, le fetch (course du vent) maximum, qui est de plus de 1 900 m, se produit lorsque le vent souffle du sud, mais les valeurs chutent fortement quand les flux s'écartent de cette direction. Du 1er au 31 juillet 2000, au cœur de la saison chaude, la valeur moyenne du Nombre de Wedderburn était égale à 38,7. Le Nombre de Wedderburn était supérieur à 10 (stabilité très élevée) pendant 59,1 % des 744 heures, compris entre 3 et 10 (stabilité assez élevée) pendant 27,6 %, entre 1 et 3 (légère stabilité) pendant 11,0 %. Cela signifie que, pendant le mois le plus chaud de l'année, l'étang le plus profond de notre échantillon n'était pas stable pendant seulement 9,5 % du temps (Nombre de Wedderburn inférieur à 1).

Dans le Grand Étang de Cieux, la chaîne de bouée à laquelle sont fixés les instruments de mesure enregistre les températures au-dessus de la plaine centrale, à 300 m au nord-est de la chaussée, dans une colonne d'eau d'environ 3,0 m de profondeur. Les données météorologiques sont celles de l'aéroport de Limoges-Bellegarde. Du fait de la forme multilobée de l'étang, le fetch maximum se produit quand les flux soufflent du nord-est, mais de nombreuses autres directions provoquent de longues courses de vent (1000 m depuis le N, 860 m depuis le NNE, 430 m depuis l'ENE, 330 m depuis l'OSO, etc.). Du 1er au 17 juin 2002, soit pendant 398 heures, la valeur moyenne du Nombre de Wedderburn était égale à 11,7. Le Nombre de Wedderburn était supérieur à 10 pendant 29,1 % du temps total, compris entre 3 et 10 pendant 22,9 %, entre 1 et 3 pendant 20,8 %. Cela signifie que l'étang de Cieux n'était pas stable pendant 27,1% du temps (Nombre de Wedderburn inférieur à 1).

L'étang des Oussines, représentatif des plans d'eau de la Montagne Limousine (plateau de Millevaches), est situé à 836 m d'altitude. Notre chaîne de bouée enregistre les températures au-dessus de la plaine centrale, à 120 m au nord-est de la chaussée, dans une colonne d'eau de 1,8 m de profondeur. Les données météorologiques sont celles de la station Météofrance d'Ussel-les-Plaines, à 670 m d'altitude, où les vents forts sont plus fréquents que sur les bas plateaux. Du fait de la taille de l'étang et de sa forme coudée, le fetch maximum (de plus de 600 m) se produit pour un vent de sud-est. Du 1er au 31 mai 2002, au début de la saison chaude, la valeur moyenne du Nombre de Wedderburn était égale à 9,8. Le Nombre de Wedderburn était supérieur à 10 pendant 28,6 % des 744 heures,

compris entre 3 et 10 pendant 22,4 % du temps, entre 1 et 3 pendant 14,8 % du temps. Du 1er au 19 juin 2002, pendant 450 heures, la valeur moyenne du Nombre de Wedderburn était égale à 33,0. Le Nombre de Wedderburn était supérieur à 10 pendant 52,9 % du temps total, compris entre 3 et 10 pendant 18,4 %, entre 1 et 3 pendant 14,0 %. Cela signifie que l'étang le moins profond de notre échantillon, qui plus est situé sur les plateaux les plus hauts en altitude et les plus soumis à l'action du vent, n'était pas stable (Nombre de Wedderburn inférieur à 1) pendant 34,1 % du temps en mai et seulement 14,2 % en juin.

La comparaison entre Cieux et les Oussines semble montrer que la superficie de l'étang (qui augmente la course du vent) est un critère plus important que l'altitude (qui augmente la force du vent). Plus l'étang est petit, plus le Nombre de Wedderburn s'accroît.

Si l'on prend les 2 336 heures allant de mai à juin pour les trois étangs de la Pouge, de Cieux et des Oussines, on obtient un Nombre de Wedderburn supérieur à 10 pendant 40,9 % du temps total, compris entre 3 et 10 pendant 23,4 % du temps, entre 1 and 3 pendant 14,6 % du temps, inférieur à 1 pendant 21,1 % du temps.

3.2. A courte échelle de temps

Une focale sur le Grand Étang de Cieux entre les 6 et 7 juin 2002 permet de comparer la succession horaire des profils de température avec l'évolution des écarts de densité, ainsi que celle de la flottabilité, du brassage et du Nombre de Wedderburn au cours d'un cycle diurne.

A 19 h (17 h UTC), le profil de température est représentatif de la situation en soirée après une journée ensoleillée de fin de printemps. L'eau est chaude en surface et froide au fond, de sorte que la stratification est nette, le gradient de la couche intermédiaire étant de 1,8°C.m^{-1}. Un vent assez fort qui avait soufflé pendant plusieurs heures durant l'après-midi avait homogénéisé un épistagnion d'environ 80 cm d'épaisseur, si bien que le profil thermique est convexo-concave. L'écart de densité entre l'épistagnion et l'hypostagnion est net, mais la flottabilité reste plutôt faible, car la thermocline n'est pas profonde. Cette situation dure jusqu'à 23 h, n'évoluant que très peu : le profil se contente de se refroidir parallèlement à lui-même par convection libre, faisant ainsi légèrement diminuer la flottabilité. Quant au vent assez fort qui avait soufflé tout l'après-midi et jusqu'à 19 h, il avait provoqué un brassage forcé, la résultante d'un numérateur bas et d'un dénominateur élevé étant un Nombre de Wedderburn bas.

A minuit heure d'été (22 h UTC), la convection libre se poursuit, faisant décroître les températures de surface et de subsurface, tandis que survient un début de convection forcée, qui rend le profil convexe, d'où une augmentation soudaine de la flottabilité. Le Nombre de Wedderburn augmente donc, mais cet accroissement est freiné par l'importance du vent, si bien qu'il n'atteint pas 5.

A 3 h (1 h UTC), après que le vent a chuté, la convection thermique devient le processus exclusif et affaiblit le gradient de température. Mais la

thermocline reste dans les couches profondes, de sorte que la flottabilité, bien qu'elle décroisse, conserve des valeurs élevées. Comme le temps est calme, le brassage forcé est quasiment absent et le Nombre de Wedderburn dépasse 11, atteignant alors sa valeur maximale pendant ce cycle diurne. Cette situation perdure pendant le reste de la nuit et jusqu'au petit matin.

4. Discussion et conclusion : une stabilité durable des étangs de profondeur supérieure à 2 m

Notre recherche montre que la stabilité des étangs de plus de 1,8 m de profondeur, quantifiée par le Nombre de Wedderburn, est plus durable qu'il n'est habituellement dit dans la bibliographie qui traite des étangs limousins (Combrouze, 2000, s'appuyant sur des mesures ponctuelles) et dans la littérature scientifique internationale qui traite des lacs de barrage pelliculaires (selon Krambeck *et al*., 1994, en Israël, la stratification durable se réalise seulement pour des plans d'eau de plus de 4 m de profondeur). Notre recherche confirme les valeurs mesurées et calculées dans les étangs russes par M. Gorbunov (2007), abaissant même légèrement à 1,8 m la profondeur limite de 2 m à partir de laquelle les plans d'eau de moins de 100 ha sont stables. Dans les étangs limousins ici étudiés, dont la profondeur est supérieure à 1,8 m, le Nombre de Wedderburn dépasse la valeur de 1 pendant 79 % du temps de la saison chaude (printanière et estivale). Pendant 41 % du temps, la thermocline peut être assimilée à un plan horizontal, si bien que des modèles bi-couche peuvent être utilisés pour prévoir le fonctionnement des étangs. Le facteur principal favorisant la stabilité des étangs limousins se trouve être leur grande profondeur relative (au sens d'un fort indice de creux). Dans certains cas, cela est accentué par le caractère encaissé et l'étroitesse du vallon. Les étangs, au sens de plans d'eau d'une superficie comprise entre 0,1 et 100 ha et d'une profondeur comprise entre 1 et 6 m, devraient, selon nous, être considérés comme des masses d'eau originales, ne pouvant être confondues avec des lacs ou des cours d'eau dans les politiques de gestion de l'eau et d'aménagement du territoire.

Nos mesures horaires montrent qu'un vent modéré augmente le Nombre de Wedderburn, mais qu'un fort vent l'abaisse. Cela confirme le fait qu'une brise approfondit la thermocline, tandis qu'un vent violent la détruit. Horne et Goldman (1994) avaient déjà noté ce double phénomène dans l'épilimnion des lacs.

Il convient cependant de reconnaître que le Nombre de Wedderburn peut, dans certains cas, poser des difficultés d'interprétation, et qu'il n'est pas toujours adapté à une démarche de recherche en géographie appuyée sur de vraies mesures de terrain. En effet, cet indice a été conçu au départ pour les modèles mathématiques assimilant les lacs à des bassins rectangulaires et les thermoclines épilimniques à des plans (Shintani *et al*., 2010). S'il est utilisé dans d'autres buts, des biais peuvent apparaître. Ainsi la transformation d'un profil de température en fonction de la profondeur qui est convexo-concave en un profil qui devient convexe entraîne mathématiquement une forte augmentation de la flottabilité,

même si, dans la réalité géographique, ce profil n'a pas changé par convection forcée, mais uniquement par convection libre tout en restant dans la marge d'erreur du thermomètre et de la courbe d'interpolation entre deux instruments. Le profil du 7 juin 2002 à 22 h UTC dans l'étang de Cieux peut être considéré comme un tel cas.

Quoi qu'il en soit, la stabilité dans les étangs du Centre-ouest français est élevée et leur stratification thermique est beaucoup plus durable que celle des thermoclines quotidiennes subsuperficielles situées dans l'épilimnion des lacs, bien qu'elle soit évidemment moins durable que celle des thermoclines-mères saisonnières. C'est pourquoi nous avions proposé dans de précédentes publications (Touchart, 2002, 2007) de nommer « épistagnion » la couche de brassage superficielle d'étang, limitée vers le bas par une couche de saut (un « métastagnion ») comprenant une thermocline de durée intermédiaire entre le cycle diurne et le cycle saisonnier, c'est-à-dire restant stable pendant quelques jours à quelques semaines d'affilée.