



HAL
open science

Le risque de dégradation de la qualité de l'eau des lacs de la réserve naturelle de Kurtna (Estonie) : le cas de la température et de l'oxygène dissous

Laurent Touchart, Camille Millot, Véronique Maleval, Tiiu Koff, Galina Kapanen, Jaanus Terasmaa, Egert Vandel, M. Vainu, Rachid Nedjaï, Pascal Bartout, et al.

► To cite this version:

Laurent Touchart, Camille Millot, Véronique Maleval, Tiiu Koff, Galina Kapanen, et al.. Le risque de dégradation de la qualité de l'eau des lacs de la réserve naturelle de Kurtna (Estonie) : le cas de la température et de l'oxygène dissous. *Riscuri si Catastrofe*, 2013, 13 (XII), pp.49-62. hal-00933395v2

HAL Id: hal-00933395

<https://hal.science/hal-00933395v2>

Submitted on 14 Oct 2018

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.

LE RISQUE DE DÉGRADATION DE LA QUALITÉ DE L'EAU DES LACS DE LA RÉSERVE NATURELLE DE KURTNA (ESTONIE) : LE CAS DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'OXYGÈNE DISSOUS

*L. TOUCHART¹, C. MILLOT¹, V. MALEVAL², T. KOFF³, G. KAPANEN³,
J. TERASMAA³, E. VANDEL³, M. VAINU³, R. NEDJAI¹, P. BARTOUT¹,
A. AZAROUAL¹*

ABSTRACT. Environmental risk about water quality of lakes in Kurtna landscape reserve (Estonia) by the study of water temperature and dissolved oxygen. The Kurtna reserve (North-Eastern Estonia) includes about forty lakes of hydro-glacial origin, among which the most are kettle hole lakes. Their level and the quality of water are conditioned by aquifers, which are threatened by industrial activities (sand quarry, peat production and oil shale excavation). The paper presents results of a field campaign in March 2013, for measuring water temperature, dissolved oxygen and salinity in two ice-covered lakes (Martiska and Nõmme). Martiska is a closed lake. A large (from 0 °C to 4 °C) inverse thermal stratification takes place under the ice. The very thick anoxic layer may be caused by the cumulating effect of the ice barrier and the consumption in a rich in organic matter lake. Nõmme fits in a hydrographical chain with tributaries and an emissary. The inverse thermal stratification is disturbed by a well delimited mid-layer. Temperature, dissolved oxygen and salinity show that it is probably the fluvial water body, which has entered the lake. The hypothesis is confirmed by the study of the river plume. This inflow is rich in dissolved oxygen. We may suggest, that the lakes with an affluent are less threatened by the winter lack of oxygen than the closed lakes of the region.

Key-words: ice-covered lake, water temperature, inverse stratification, dissolved oxygen.

Introduction

Au nord-est de l'Estonie, le territoire de Kurtna forme une région lacustre dans un cadre pittoresque, par son paysage collinéen boisé et sa flore préservée. Ce

¹ Laboratoire de géographie EA 1210 CEDETE de l'Université d'Orléans (France).

² UMR GEOLAB de l'Université de Limoges et EA 1210 CEDETE de l'Université d'Orléans (France).

³ Institut d'Ecologie de l'Université de Tallinn (Estonie).

territoire a le statut de réserve naturelle depuis 1987, quand le pouvoir soviétique créa ici le *zapovednik* paysager de Kurtna. L'importance paysagère vient de la densité des petits lacs naturels, au nombre d'une quarantaine sur à peine une trentaine de kilomètres carrés (**fig. 1**).

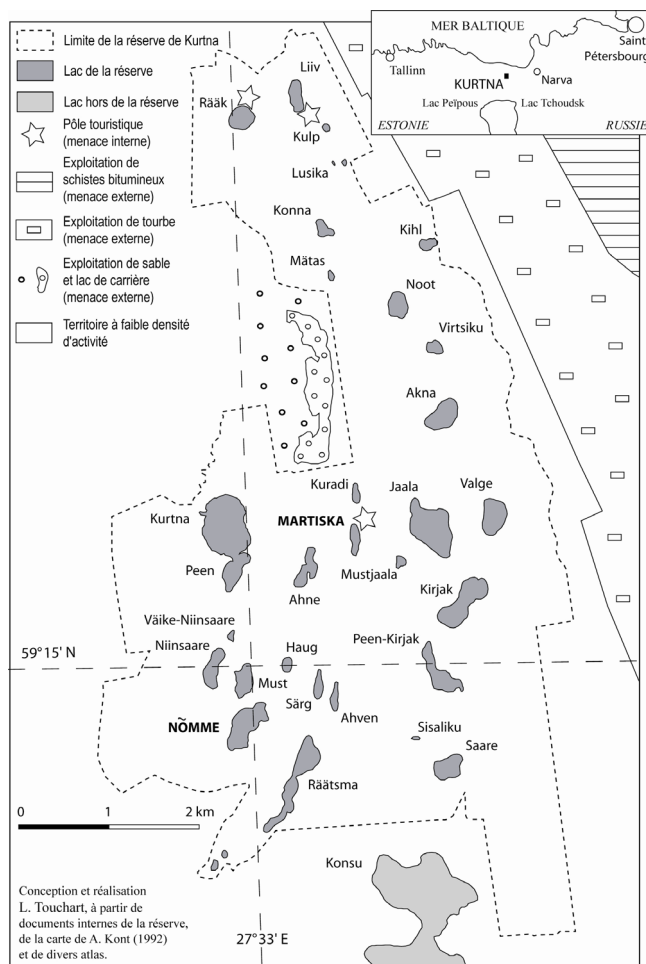


Figure 1. Localisation des lacs de la réserve naturelle de Kurtna en Estonie.

Selon les autorités de la réserve, 193 hectares sont en eau sur une superficie de 2 805 hectares, soit une limnité de 6,9 %. Or un certain nombre de menaces pèsent sur ces lacs : d'une part l'utilisation de la tourbe, associée au drainage, l'extraction de sable dans des carrières à ciel ouvert et l'exploitation minière de schistes bitumineux (*põlevkivi* en estonien, *gorjučij slanec* en russe), à seulement

quelques dizaines ou centaines de mètres des limites de la réserve naturelle, d'autre part les rejets de l'activité touristique au sein même du territoire préservé.

Le risque limnologique est ainsi double, à la fois quantitatif et qualitatif. D'une part, la nappe s'abaisse et certains plans d'eau, alimentés par elle, se réduisent, voire, pour les plus petits d'entre eux, menacent de disparaître. D'autre part, la qualité de l'eau se dégrade, par l'apport de matières nutritives, de trop de calcium et de matière organique. Le risque d'eutrophisation et de désoxygénation augmente. Cette dégradation de la qualité touche les lacs et la nappe, diminuant la richesse floristique aquatique, donc l'attrait touristique, et perturbant l'alimentation en eau potable des localités voisines de Jõhvi et Ahtme.

Devant la complexité du problème, une étude géographique complète s'impose et les chercheurs estoniens s'y emploient depuis plusieurs décennies. Une utile synthèse fut publiée en ce sens il y a une vingtaine d'années (Punning J.-M., Ed, 1994), regroupant les résultats de nombreuses recherches plus précises, qui se poursuivent aujourd'hui. La part belle y est donnée à l'étude des sédiments lacustres (Punning *et al.*, 2007, Marzecová *et al.*, 2011). L'objet de la présente recherche franco-estonienne est centré sur la température de l'eau et la teneur en oxygène dissous de deux lacs de la réserve de Kurtna, lors d'une mission de terrain réalisée en mars 2013. C'est un maillon qui peut permettre une meilleure compréhension dans deux domaines. Il s'agit d'abord d'une contribution directe à l'étude de la qualité de l'eau. Le phénomène naturel de la prise en glace des lacs de cette région aggrave-t-il les problèmes de désoxygénation ? Il s'agit ensuite d'un apport indirect à une meilleure connaissance du bilan d'eau de ces lacs et de leurs sources d'alimentation, souterraines et superficielles, une sorte de traçage de certains flux.

1. Le site d'étude : la région des lacs de Kurtna

Sur le plan de la géomorphologie structurale, la région lacustre de Kurtna est un plateau situé à l'extrémité nord-ouest de la table russe, à une quinzaine de kilomètres au sud de l'escarpement en forme de pseudo-cuesta, dit glint, où les calcaires durs de l'ère primaire, au sein desquels s'intercalent des veines de schistes bitumineux, dominant le socle plus ancien mis en creux (**photo 1**). Précisément au niveau du chapelet lacustre de Kurtna, une vallée fossile, la Vasavere, s'encaisse d'une quarantaine de mètres dans le plateau calcaire (Tavast et Raukas, 1982, Erg, 1994). Invisible aujourd'hui dans le paysage, elle a été comblée par de minces dépôts glaciaires et de très épais dépôts fluvio-glaciaires, qui recouvrent aussi les interfluves du plateau calcaire.

En effet, en termes de modelé, le paysage géomorphologique est typique de formes de marge glaciaire de l'ancien inlandsis. Un drumlin borde certes la région au sud (Kont, 1992), mais, situé à l'ouest du lac Konsu, il se trouve juste en dehors des limites de la réserve naturelle. A l'intérieur du périmètre protégé, les modelés sont en



Photo 1. Le glint estonien, pseudo-cuesta des calcaires primaires au-dessus du socle cristallin. Cliché L. Touchart, mars 2013.

fait hydro-glaciaires. L'extrême sud de la réserve est accidenté d'une levée construite par les dépôts d'un ancien torrent sous-glaciaire sous de gros blocs de glace morte. Cette accumulation très allongée, qui flanque le lac Räätsma par l'ouest, déborde vers le sud très au-delà des limites de l'aire protégée, pour s'étirer sur une vingtaine de kilomètres (Kont A., 1992). En dehors de cet ôs, tout le territoire de la réserve naturelle est formé d'un champ de kames (Ilomets, 1994). A la fin de la dernière période de la glaciation de Valdaï (Ilomets, 1994) l'actuelle région de Kurtna était occupée de gros blocs de glace morte alimentant des eaux de fonte. Celles-ci laissèrent des dépôts grossiers dans les dépressions situées entre les masses de glace stagnante, tantôt à l'air libre, tantôt dans de petits lacs. Depuis la disparition de la glace et des lacs juxtaglaciaires, ces accumulations dominent le modelé en collines arrondies et en buttes à sommet plat. C'est ce matériel, souvent sableux, qui est exploité à Pannjärve, faisant reculer ou disparaître certaines d'entre elles.

Aujourd'hui, ces collines de kame sont séparées les unes des autres par plusieurs dizaines de petites dépressions fermées, occupées par des marais tourbeux pour certaines, par des lacs pour d'autres. Elles ont pour origine la fonte sur place des blocs de glace morte, effectuée tardivement lors du stade de Pandivere (Ilomets, 1994) de la dernière période de Valdaï. Les auteurs estoniens parlent de « glaciokarst » pour la formation de ces dépressions fermées (Raukas A., 1995). Les lacs actuels de Kurtna (**photo 2**) sont donc, pour la plupart, des plans d'eau de dépression fermée de culot de glace morte (Karukäpp, 2005), dits *kettle hole lakes* dans la terminologie anglo-saxonne (Hutchinson, 1957) et vouas selon une classification française (Touchart, 2000).



Photo 2. Un lac de kettle et sa forme circulaire dans la réserve de Kurtna.
Cliché L. Touchart, mars 2013.

La région de Kurtna forme une ligne de partage de eaux surbaissée entre l'écoulement vers la Baltique et le lac Peïpous, et le réseau hydrographique naturel, hésitant, est bouleversé par des chenaux artificiels et des connexions entre les bassins. En fait, la plupart des lacs de Kurtna doivent leur existence à l'affleurement de la nappe (Erg, 1994).

Le champ de kames de Kurtna est largement boisé, couvert d'une subtaïga dominée par le Pin sylvestre (**photo 3**), secondairement par le Bouleau et l'Epicéa. Dans les dépressions fermées, occupées partiellement par les lacs, on trouve assez largement, en plus du Bouleau, l'Aulne, le Saule et le Peuplier (Koff, 1994).



Photo 3. Le paysage dominant de la région de Kurtna : une subtaïga de Pins sylvestres couvrant les collines de kame. Cliché L. Touchart, mars 2013.

Les forêts de Kurtna et leurs lisières possèdent certaines espèces d'Orchidées que les autorités de la réserve ne manquent pas de mettre en avant, comme la Platanthère à deux feuilles (*Platanthera bifolia*) et l'Epipactis rouge sombre (*Epipactis atrorubens*). Mais l'intérêt floristique de la région vient surtout des espèces rares aquatiques ou semi-aquatiques présentes dans les lacs, comme la Lobélie de Dortmann (*Lobelia dortmanna*) et l'Isoète des lacs (*Isoetes lacustris*).

Le contexte humain est celui d'une aire protégée entourée de sites très humanisés, qui provoquent l'assèchement ou dégradent la qualité des eaux de la réserve naturelle enclavée. L'exploitation de la tourbe est une activité ancienne, qui se poursuit sur le site d'Oru. La limite nord-est de la réserve naturelle frange ce champ d'exploitation au niveau du principal chenal de drainage (**photo 4**).

L'extraction du sable s'effectue à l'ouest-sud-ouest de la réserve naturelle, dont la limite dessine un rentrant à cet endroit, pour exclure du territoire protégé les carrières de Pannjärve (**photo 5**). Les mines de schistes bitumineux se concentrent au nord-ouest de l'aire protégée, celles d'Ahtme, qui arrivent jusqu'aux frontières de la réserve naturelle, et au nord-est, celles de Viivikonna, à environ 4 à 5 km du territoire protégé (Roose, 1992).



Photo 4. L'exploitation de la tourbe sur le site d'Oru. Cliché L. Touchart, mars 2013.



Photo 5. L'exploitation du sable d'une colline de kame sur le site de Pannjärve. Cliché L. Touchart, mars 2013.

2. Une méthodologie géographique centrée sur la mesure des températures de l'eau et de l'oxygène dissous

Sur la quarantaine de lacs de la région, deux ont été sélectionnés, de taille moyenne, d'origine géomorphologique et d'encadrement biogéographique comparables. En revanche, leur insertion dans le réseau hydrographique est différente. Le lac Nõmme possède deux tributaires et un émissaire bien identifiés, tandis que le lac Martiska n'en a pas. Le choix des points précis de mesure s'est

fait de façon géographique, en privilégiant la réflexion spatiale. A petite échelle cartographique, les mesures ont été réalisées, quand cela était possible, à la fois dans le lac et dans les tributaires fluviaux. Mais les prélèvements dans l'émissaire n'ont pu être effectués pour des questions de sécurité, la glace menaçant de rompre. A moyenne échelle, une coupe longitudinale a été pratiquée d'amont en aval sur le lac Nõmme, où trois profils ont été réalisés sur 600 mètres. A grande échelle cartographique, chaque profil a nécessité un ensemble de mesures sur la verticale de l'ensemble de la tranche d'eau, tous les 50 cm, de la subsurface, à l'intérieur de la couche de glace, jusqu'au fond. Les mesures ont été prises le 6 mars 2013 de 10 h 30 à 16 h, heure estonienne (GMT+2) sous un temps couvert, sans soleil, sans précipitation, en régime de basses pressions atmosphériques.

La banquise lacustre ayant une épaisseur d'une cinquantaine de centimètres, une tarière mécanique, sous forme de foreuse à glace, était nécessaire. Nous avons utilisé l'*ice drill* de modèle 225A125 de la marque *Husqvarna*, qui appartient à l'Institut d'Ecologie de l'Université de Tallinn. La cylindrée est de 26,9 cm³ pour une puissance de 0,9 kW. Son avantage est la rapidité, par rapport à la méthode classique ancienne au vilebrequin (communication écrite de S. Horiuchi, Professeur à l'Université de Nihon, 1998), mais son inconvénient réside dans la grande difficulté à s'arrêter quelques millimètres avant le percement complet, afin de déranger le moins possible la stratification. L'opération a été parfaitement menée sur le lac Martiska et les points du centre et de l'aval du lac Nõmme. En revanche, le percement du point amont du lac Nõmme perturba un peu la superposition des masses d'eau.

Les mesures de température et d'oxygène dissous ont été effectuées au moyen de la sonde multiparamètre HI 9828, de la marque *Hanna*, qui appartient à l'EA 1210 CEDETE de l'Université d'Orléans. La sonde thermique, de résolution au centième de degré, a une précision de 0,15 °C et elle est étalonnée en usine. La sonde oxymétrique a une précision de 0,1 % pour des valeurs de saturation relative comprises entre 0 et 300 %. Comme le résultat est fonction de la comparaison entre la concentration dans l'air et dans l'eau, l'étalonnage a été réalisé *in situ*, sur une sonde et une membrane neuves. L'étalonnage a été effectué en deux points, par une solution à 0 % et par de l'eau distillée à 100 % d'oxygène dissous.

3. La description des profils thermiques et oxymétriques.

3.1. Une stratification inverse qui se complexifie en profondeur

Sous la banquise d'un lac d'eau douce, la situation habituelle consiste en une stratification inverse prenant place entre les bornes maximales possibles de 0 et 4°C, la température augmentant avec la profondeur. Le profil général est concave en période de calme et d'absence d'influence extérieure. Le profil est convexo-concave si la subsurface connaît des mouvements de brassage, par exemple en cas

de polynie, d'entraînement de la glace par le vent déplaçant avec elle une mince couche d'eau subsuperficielle, d'une pluie printanière traversant partiellement la banquise, etc. (Pivovarov, 1973). Ce schéma dominant peut être perturbé par des anomalies temporaires (Kózmanski et Wisniewski, 1935). C'est dans ce cadre qu'il convient de replacer nos propres données.

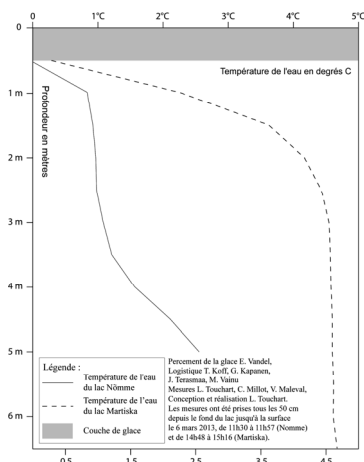


Figure 2. Les profils thermiques au centre des lacs Martiska et Nõmme

la température de densité maximale de l'eau douce. C'est un segment de stratification inverse qui prend place dans une eau à plus de 4°C. Mais l'ensemble se fait sur moins de cinq dixièmes de degré.

Au contraire, au centre du lac Nõmme, la forme générale du profil n'est pas classique, mais il n'y a pas d'anomalie des valeurs. La courbe est concavo-convexe à partir de 50 cm de profondeur. La couche de saut subsuperficielle, d'un écart de huit dixièmes de degré, est très peu prononcée. Entre 1 m et 3,5 m une couche intermédiaire étonnamment froide prend place, à des valeurs absolues toutes très proches de 1°C. Puis la température croît de plus en plus vite avec l'augmentation de la profondeur, conduisant à un saut thermique de fond.

3.2. Une désoxygénation différenciée

Les teneurs en oxygène prises dans l'eau lacustre en dessous de la banquise sont plutôt basses dans les deux lacs. La comparaison peut être conduite entre les profils pris dans la partie centrale de chacun des deux lacs, pratiquement au droit des plus grandes profondeurs (**fig. 3**).

Dans le lac Martiska, le profil est simple. Les valeurs absolues approchent 5 mg/l d'oxygène dissous, soit une saturation relative d'un peu plus de 30 %, juste sous la glace, puis 0,8 mg/l et 6 % à 1 m de profondeur. En dessous, l'anoxie est complète.

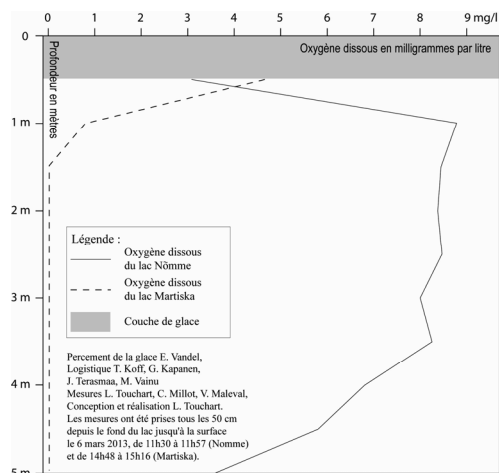


Figure 3. Les profils oxymétriques au centre des lacs Martiska et Nõmme

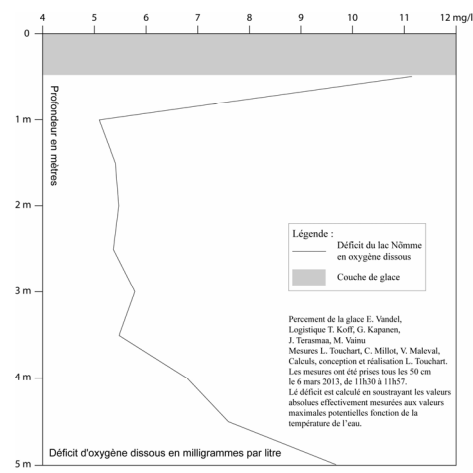


Figure 4. Profil du déficit en oxygène au centre du lac Nõmme

La situation au point central du lac Nõmme est plus complexe. Juste sous la glace, les valeurs sont en fait assez proches de celles du lac Martiska, dépassant un peu les 3 mg/l et les 20 %.

Mais une masse d'eau beaucoup plus oxygénée prend place entre 1 m et 3,5 m. Dans cette couche d'eau, toutes les mesures tournent autour de 8,5 mg/l d'oxygène dissous et de 60 % de saturation relative. Les particularités de la couche d'eau intermédiaire apparaissent encore plus clairement si l'on choisit comme mode de représentation le déficit en oxygène (**fig. 4**).

En dessous de 3,5 m, une couche de fond moins oxygénée se distingue nettement, cependant que, même au fond, à 5 m, les valeurs ne tombent pas en dessous de 3,6 mg/l et 27 %.

4. Une discussion géographique faisant apparaître deux types de lac

4.1. Le rôle thermique des masses d'eau allogènes

Le lac Martiska présente un profil thermique classique, qui n'est pas remis en cause par la très légère anomalie thermique de fond. Certes, selon nos mesures, les solides dissous totaux passent de 44 parties par million en subsurface (0,5 m) à 76 au fond (6,5 m). Mais les différences de masse volumique que cela provoque sont insignifiantes. Il faut plutôt y voir un effet de la marge d'erreur de la sonde thermique ou bien une situation temporaire instable de léger réchauffement au contact de la nappe ou des sédiments.

Dans le lac Nõmme, la masse d'eau étonnamment froide située entre 1 m et 3,5 m, et, de façon un peu moins prononcée, en dessous encore, pourrait s'expliquer par l'entrée et la plongée de la rivière principale. Les éléments en faveur de cette hypothèse sont les suivants. D'une part la température prise dans l'affluent correspond exactement à celle du point central du lac à 4 m de profondeur, soit 1,56°C. On peut suggérer que l'eau de l'affluent plonge en se mélangeant avec les couches sus-jacentes du lac, qui sont les plus froides, et en les entraînant en partie vers la profondeur. D'autre part, cette hypothèse est confirmée par les mesures prises dans le lac en amont, à seulement quelques dizaines de mètres de l'entrée de l'affluent. Les valeurs sont très proches de celles mesurées au centre du lac (**fig. 5**).

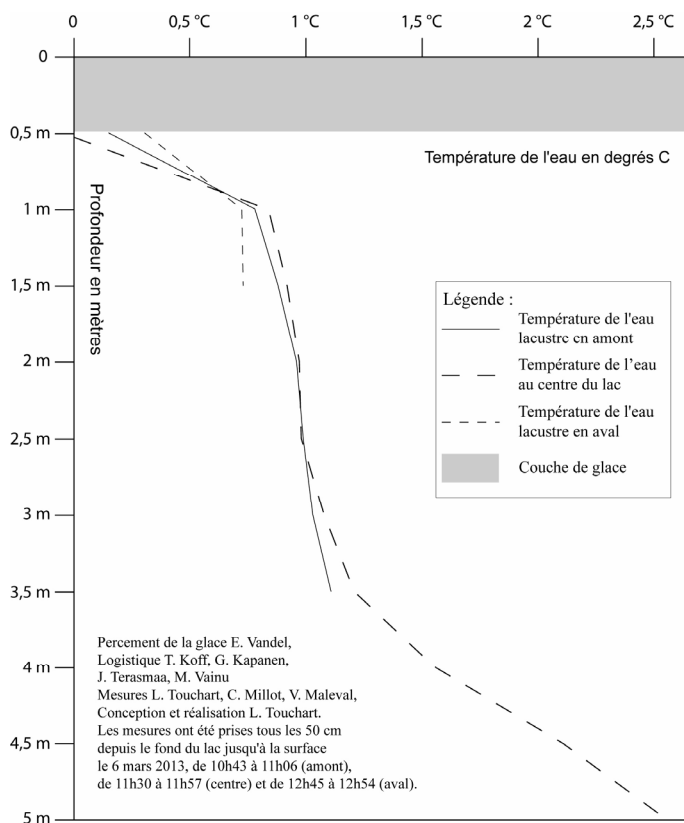


Figure 5. Les profils thermiques d'amont en aval dans le lac Nõmme

Le profil est seulement légèrement moins froid sur les premiers 80 cm, ce qui confirmerait le rôle adoucissant de l'affluent en surface, plus près de son entrée

dans le lac. La bibliographie internationale donne un certain nombre d'exemples de l'arrivée d'eaux fluviales ou de ruissellement dans les lacs gelés, qui, en fin d'hiver et au début du printemps, sont moins froides, donc plus denses, que les eaux lacustres (Ellis *et al.*, 1991).

4.2. Les facteurs d'apport et de consommation d'oxygène.

4.2.1. Causes hydrophysiques des différences entre le Martiska et le Nõmme.

Le lac Martiska manque complètement d'oxygène. Certes, la banquise lacustre, qui empêche les échanges avec l'atmosphère, est connue de façon générale pour provoquer l'anoxie, surtout en fin d'hiver, quand la consommation a eu lieu pendant plusieurs mois d'affilée sans possibilité de renouvellement (Terzhevik & Golosov, 2012). Cependant, les valeurs sont ici si basses que la seule explication physique n'est pas suffisante.

Au contraire du Martiska, le Nõmme ne se comporte pas comme un lac clos, sans échange avec son bassin d'alimentation. La bonne oxygénation de la couche intermédiaire semble pouvoir s'expliquer par la plongée de l'affluent. Comme l'eau de la rivière est moins froide et plus chargée en éléments dissous que l'eau de subsurface du lac (388 ppm de solides dissous totaux contre 180), cette masse allogène plonge dans le lac, pour s'intercaler à la densité qui est la sienne. Cette eau fluviale, qui compte 10,24 mg/l d'oxygène dissous et 75 % de saturation relative, alimente ainsi en oxygène la strate du lac située entre 1 et 4 m. De fait, le lac Nõmme est l'un de ceux de la région de Kurtna à ne pas être alimenté par le seul recoupement de la nappe, mais aussi par un réseau hydrographique.

4.2.2. Causes biogéographiques des différences entre le Martiska et le Nõmme

La mission de terrain du 6 mars 2013 n'a pas été accompagnée d'étude biogéographique des deux lacs. L'anoxie complète des couches profondes du Martiska doit cependant tenir aussi, outre l'écran de la banquise, à une forte consommation, en pleine eau et dans les sédiments, en lien avec la tourbe ou une eutrophisation importante. Dans le lac Nõmme, la désoxygénation des plus grandes profondeurs, en dessous de la masse allogène intercalée, est moins nette. L'influence des sédiments organiques semble moins forte.

4.2.3. La question méthodologique des différences entre l'amont l'aval dans le Nõmme

Les profils réalisés dans le lac Nõmme au niveau du point de l'amont sont plus complexes à analyser, car, au-dessus de l'anomalie expliquée précédemment en dessous de 1 m, se trouve une autre anomalie à 50 cm. Mais celle-ci, seulement

oxymétrique, ne correspond à aucune anomalie thermique. Un biais méthodologique n'est pas à exclure : le percement de la glace a légèrement débordé sur la colonne d'eau du point d'amont. Un brassage forcé opéré par la foreuse, qui aurait oxygéné la surface et subsurface, a peut-être eu lieu.

Conclusion

La campagne de mesures du 6 mars 2013 sur deux des lacs de la réserve naturelle de Kurtna a permis de dégager quelques premières tendances concernant la qualité physico-chimique des plans d'eau de cette région, par ailleurs déjà assez bien connus sur le plan sédimentaire. Le lac Martiska représente les plans d'eau fermés de dépression de culot de glace morte alimentés par la nappe. Une stratification thermique inverse complète prend place sous la banquise, de près de 0 °C en subsurface à environ 4 °C au fond. L'anoxie est totale à partir de 1,5 m de profondeur, sans doute à cause du cumul de la barrière glacielle qui empêche les échanges avec l'atmosphère et de la consommation d'un plan d'eau eutrophisé. Le lac Nõmme représente les plans d'eau insérés dans une chaîne hydrographique, comme un maillon entre les tributaires et l'émissaire. La stratification thermique inverse y est perturbée par une masse d'eau intermédiaire bien identifiée, dont les caractères se distinguent de l'eau lacustre encadrante, provenant sans doute de la plongée de l'affluent. Cette masse d'eau allogène apporte au lac sa richesse en oxygène dissous et joue donc un rôle très important pour la santé du plan d'eau. Toutes choses égales par ailleurs, les lacs de Kurtna alimentés par des tributaires ont certainement une capacité d'autoépuration et de résistance aux apports de nutriments supérieure à celle des lacs clos.

Ce travail n'est qu'une première étape succincte, ne donnant lieu qu'à quelques hypothèses. De nombreuses autres recherches seront à mener ultérieurement. Il faudra notamment étudier les organismes vivant dans l'eau, en particulier par des prélèvements de plancton, et corrélérer nos travaux sur la qualité de l'eau avec les analyses sédimentaires passées et en cours dans les laboratoires estoniens, au moins concernant la matière organique. Il conviendra aussi de suivre les nutriments. La question de l'éventuel relargage du phosphore à partir des sédiments vers la base de la colonne d'eau dans des conditions anaérobies sera au centre de futures recherches communes. Une étude des flux entre les lacs et la nappe, ainsi qu'entre les lacs et les eaux de ruissellement superficielles, sera indispensable. Les travaux en cours du jeune doctorant de l'Université de Tallinn Marko Vainu sont à cet égard prometteurs. Un traçage isotopique pourra aussi être envisagé.

Remerciements

Les frais de mission internationaux ont été assurés par le Programme Hubert Curien franco-estonien Parrot « Sédimentation et hydrodynamique dans les étangs et les petits plans d'eau : leur rôle dans les bilans du carbone ». La logistique interne a été en partie financée par le programme estonien de recherche et développement EDULOOD sur la préservation et les technologies de l'environnement. Les instruments de mesures et les appareillages ont été mis à disposition par l'Institut d'Ecologie de l'Université de Tallinn et l'EA 1210 CEDETE (laboratoire de géographie) de l'Université d'Orléans. Nous tenons à remercier Monsieur le Conseiller de coopération et d'action culturelle de l'Ambassade de France en Estonie, Bernard Paquetteau, et Monsieur l'Attaché scientifique et universitaire, Alexandre Nurit, pour l'intérêt porté à notre sujet de recherche et leur aimable réception à Tallinn.

BIBLIOGRAPHIE

1. Erg K., (1994), "*The hydrogeological regime*" in Punning J.-M., Ed, The influence of natural and anthropogenic factors on the development of landscapes, the results of a comprehensive study in NE Estonia. Tallinn, Institute of Ecology, Estonian Academy of Sciences, 227 p. : 94-101.
2. Ellis C.R., Stefan H.G. & Gu R., (1991), *Water temperature dynamics and heat transfer beneath the ice cover of a lake*. Limnology and Oceanography, 36 : 324-335.
3. Forel F.-A., (1895), *Le Léman, monographie limnologique*. Lausanne, F. Rouge, tome II, 651 p.
4. Hutchinson G.E., (1957), *A Treatise on Limnology*, vol. I, Geography, Physics and Chemistry. New York, J. Wiley and Sons, 1015 p.
5. Ilomets M. & Kont A., (1994), "Study area" in Punning J.-M., Ed, The influence of natural and anthropogenic factors on the development of landscapes, the results of a comprehensive study in NE Estonia. Tallinn, Institute of Ecology, Estonian Academy of Sciences, 227 p.: 14-17.
6. Karukäpp R., (2005), "*Eskers in the periphery of their distribution in North Estonia*" Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology, 54(1): 26-39.
7. Koff, (1994), "*The development of vegetation*" in Punning J.-M., Ed, The influence of natural and anthropogenic factors on the development of landscapes, the results of a comprehensive study in NE Estonia. Tallinn, Institute of Ecology, Estonian Academy of Sciences, 227 p. : 24-57.
8. Kont A., 1992, *Kirde-Eesti, Vaatamisväärsused ja kaitstavad alad, sights and protected areas, dotoprimečatel'nosti i ohranjaemye territory*. Tartu, Regio, 1/200000.
9. Kózmínski Z. et Wisniewski J., 1935, „Über die Forfrühlingthermik der Wigry-Seen“ Archiv für Hydrobiologie, 28 : 198-235.

- L. TOUCHART, C. MILLOT, V. MALEVAL, T. KOFF, G. KAPANEN, J. TERASMAA, E. VANDEL, M. VAINU, R. NEDJAI, P. BARTOUT, A. AZAROUAL
10. Marzecová A., Mikomägi A., Koff T. & Martma T., 2011, „*Sedimentary geochemical response to human impact on Lake Nõmmejärv, Estonia*” *Estonian Journal of Ecology*, 60(1) : 54-69.
 11. Pivovarov A.A., 1973, *Thermal conditions in freezing lakes and rivers*. New York, John Wiley and Sons, 136 p.
 12. Punning J.-M., Ed, (1994), *The influence of natural and anthropogenic factors on the development of landscapes, the results of a comprehensive study in NE Estonia*. Tallinn, Institute of Ecology, Estonian Academy of Sciences, 227 p.
 13. Punning J.-M., Boyle J.F., Terasmaa J., Vaasma T. & Mikomägi A., (2007), “*Changes in lake sediment structure and composition caused by human impact : repeated studies on Lake Martiska, Estonia*” *The Holocene*, 17(1) : 145-151.
 14. Raukas A.,(1995), *Eesti Loodus, Estonia Nature*, Estonija Priroda. Tallinn, Valgus, 606 p.
 15. Roose A., (1992), *Kirde-Eesti, Inimmõju, human impact, antropogennaja nagruzka*. Tartu, Regio, 1/200000.
 16. Tavast E. et Raukas A., 1982, *Rel'ief korenyh porod v Estonii*. Tallin, Valgus, 194 p.
 17. Terzhevik A. & Golosov S., (2012), « *Dissolved oxygen in ice-covered lakes* » in Bengtsson L., Herschy R.W. & Fairbridge R.W., Ed, *Encyclopedia of lakes and reservoirs*. Dordrecht, Springer, 953 p. : 220-222.
 18. Touchart L. (2000), *Les lacs, origine et morphologie*. Paris, L'Harmattan, 210 p.