Dynamiques environnementales

Journal international de géosciences et de l'environnement

42 | 2018

Du glint baltique au lac Peïpous

Le développement des petits lacs d'Estonie : études paléolimnologiques

Egert Vandel et Tiit Vaasma

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/dynenviron/2020>

DOI : 10.4000/dynenviron.2020

ISSN : 2534-4358

Traduction(s) :

Development of small lakes in Estonia: paleolimnological studies - URL : <https://journals.openedition.org/dynenviron/2533> [en]

Éditeur

Presses universitaires de Bordeaux

Édition imprimée

Date de publication : 1 juillet 2018

Pagination : 208-235

ISSN : 1968-469X

Référence électronique

Egert Vandel et Tiit Vaasma, « Le développement des petits lacs d'Estonie : études paléolimnologiques », *Dynamiques environnementales* [En ligne], 42 | 2018, mis en ligne le 01 juin 2019, consulté le 04 mars 2022. URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/2020> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/dynenviron.2020>

La revue *Dynamiques environnementales* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

le développement des petits lacs d'Estonie : études paléolimnologiques

Egert Vandel, Tiit Vaasma

Institut d'écologie de l'université de Tallinn
Uus-Sadama 5, 10120 Tallinn, Estonie.
egert.vandel@tlu.ee

English text p. 368

Résumé

Dans cette étude, nous donnons un aperçu des études paléolimnologiques qui révèlent comment les lacs estoniens et les paysages qui les entourent se sont développés au cours de l'Holocène. L'étude se concentre principalement sur les études menées par l'Institut d'Écologie de l'Université de Tallinn. Le développement des lacs et de leur environnement écologique peut se diviser sommairement en deux grandes périodes : l'étape naturelle allant de l'émergence des lacs après le retrait des glaciers continentaux aux signes des premières perturbations d'origine anthropique, et la période où l'activité humaine a clairement influencé le lac et son environnement.

Mots-clés

Méthodes paléolimnologiques, sédiments lacustres, sédiments organiques, fluctuations du niveau d'eau, changement climatique, impact humain, succession végétale, pollen, granulométrie, macrofossiles, écosystème lacustre, eutrophisation, détérioration lacustre.

Introduction

Les sédiments lacustres sont l'une des sources stratigraphiques les plus complètes qui puissent être utilisées pour obtenir des informations sur le climat, la végétation et les processus hydroécologiques antérieurs. Ceux d'Estonie sont riches en matériaux organiques et sont relativement épais (5 à 7 m), ce qui rend possible l'étude des processus antérieurs avec une haute résolution temporelle. En Estonie, les sédiments lacustres sont couramment extraits pendant l'hiver, lorsque les lacs sont recouverts d'une solide couche de glace (figure 1) ou pendant l'été à l'aide d'un radeau (figure 2),

qui offre une surface stable sur laquelle travailler. Les sédiments sont extraits principalement grâce à deux foreuses : la foreuse Livingstone-Vallentyne (figures 3 et 4) pour des sédiments situés plus près de la surface (jusqu'à 1 m) et la foreuse à tourbe biélorusse (figure 5) pour des sédiments situés plus en profondeur jusqu'au bassin lacustre minérogénique. En fonction de l'objet d'étude, les sédiments sont souvent sous-échantillonnés afin d'obtenir une épaisseur de 1 à 5 cm (figure 6), donnant ainsi une résolution temporelle moyenne de 10 à 100 ans par échantillon. Les sédiments recouvrant toute la période de l'Holocène (ère géologique actuelle qui a commencé après la dernière ère gla-

*Figure 1 : Extraction
de sédiments lacustres
pendant l'hiver depuis
la couche de glace
(photo : T.Koff).*

*Figure 2 : Extraction
de sédiments lacustres
pendant l'été depuis le
radeau (photo : J. Te-
rasmaa).*

ciaire environ 11 700 ans BP) sont datés par la méthode de la spectrométrie de masse par accélérateur (AMS) à partir du ^{14}C issu de composés organiques extraits des échantillons de sédiments.

À l'Institut d'Écologie, nous employons une approche multiproxy lorsque nous étudions les lacs, c'est-à-dire qu'une série de différentes méthodes et analyses sont faites en parallèle : lithologie des sédiments,

Figure 3 : Extraction de sédiments lacustres avec une foreuse Livingstone-Vallentyne (photo : J. Terasmaa).

granulométrie de la matière minérale, des macrofossiles, du pollen, des diatomées... Les méthodes englobent des processus à l'intérieur du lac aussi bien que sur son bassin versant, ce qui permet d'avoir un aperçu extrêmement complet de l'écosystème lacustre. Par exemple, les macrofossiles fournissent des informations sur la végétation qui pousse dans le lac ainsi que dans ses environs immédiats, ce qui permet également de reconstruire des changements antérieurs du niveau du lac, car des plantes aquatiques différentes poussent dans des profondeurs différentes. L'analyse pollinique nous donne des informations sur la végétation du bassin versant et des environs, ce qui permet de tirer des conclusions sur la succession de la végétation et donc sur les conditions climatiques, mais

Figure 4 : Découpe et sous-échantillonnage de sédiments lacustres (photo : J. Terasmaa).

Figure 5 : Une section de carotte de sédiments extraite par une foreuse à tourbe biélorusse (photo : J. Terasmaa).

Figure 6 : Carotte de sédiments de 1 m de long (obtenue grâce à une foreuse à tourbe biélorusse) avec des marquages tous les 1 cm (photo : T. Vaasma).

aussi sur le degré d'ouverture du bassin versant et sur le début des activités humaines (présence de pollen de céréales). Combiner les informations de ces diverses analyses permet de tirer des conclusions sur les changements survenus dans l'environnement à une échelle aussi bien locale que régionale.

Pour comprendre le passé, nous devons comprendre la situation actuelle.

Les reconstructions paléoécologiques sont fondées sur le principe de l'actualisme/uniformitarisme (d'abord formulé par Hutton en 1788), ce qui signifie que nous postulons que les processus qui ont aujourd'hui lieu dans la nature fonctionnaient de la même façon dans le passé. Pour cela, nous menons et avons mené plusieurs projets afin de clarifier la configuration de la sédimentation et les processus dans les lacs. Par

exemple, lors de la reconstruction de changements de niveau du lac à l'aide de macrofossiles, il est également important de comprendre jusqu'où les macrofossiles peuvent se disperser à partir des plantes sources. Si les macrofossiles de certaines espèces tendent à être présents dans toute la surface du lac (par exemple des fragments de graine de nénuphar blanc), d'autres se déposent près des zones d'habitats, et conviennent donc davantage pour reconstruire les niveaux antérieurs du lac (Koff et Vandell, 2008). Nous avons aussi récolté des échantillons de sédiments à la surface du lac afin de trouver des diatomées et de cartographier les assemblages de diatomées dans différents types de lacs (Punning et Puusepp, 2007, Puusepp et Punning, 2011). Différentes espèces de diatomées peuvent avoir des besoins très spécifiques concernant certaines propriétés physiques ou chimiques telles que le pH, la salinité, l'état trophique... Les données sur l'écologie du biote moderne permettent de créer un ensemble de données d'étalonnage, et une fois que les diatomées fossiles ont été déterminées, les caractéristiques environnementales modernes de l'espèce peuvent être utilisées afin de déduire les conditions environnementales antérieures (Gasse et al., 1995, Ramstack et al., 2003).

L'histoire de l'Institut d'Ecologie (IdE) remonte au début des années 1990, lorsque la paléolimnologie était l'un des principaux sujets d'étude parmi de multiples recherches environnementales menées par l'institut. De fait, dans les années 1980 les recherches paléolimnologiques systématiques commençaient déjà dans l'Estonie du nord-est, dans les lacs de la région de Kurtina où nos collègues ont mesuré les propriétés biologiques, physiques et

chimiques de différents lacs (Punning et Toots, 1987, Punning et Punning, 1987, Punning et al., 1989, Ilomets, 1987, 1989). Les études ont également continué dans les années 1990 (Punning et Sagris, 1993, Punning et Varvas, 1993, Varvas et Punning, 1993). Grâce à ces études, l'IdE a reçu le prix des Sciences de la République d'Estonie en biosciences, en géosciences et en sciences de l'agriculture en 1995. Nous avons depuis mené plusieurs projets qui clarifient la configuration de la sédimentation et les processus dans les lacs.

Le but de cette étude est de donner un aperçu des études paléolimnologiques menées par l'IdE. Nos études se concentrent principalement sur le développement des lacs et le changement environnemental dans la région entraînée par des processus naturels et des perturbations anthropiques.

Études paléolimnologiques

Les lacs (figures 7 et 8; tableau 1) étudiés par l'IdE (et nombre d'autres lacs dans cette zone) ont commencé à se former à la fin du dernier âge glaciaire il y a environ 11000 à 13000 ans lors du recul et de la fonte du glacier continental. Le sol, libéré du poids de la couche de glace (de plus de 1 km d'épaisseur), a commencé à s'élever. La glace fondait de

Figure 7 : Emplacement en Estonie et lacs étudiés (lacs Lohja, Viitna, Martiska, Nõmmejärvi, Verevi, Juusa et Kõksi).

Figure 8 : Vue typique
sur un lac estonien
(photo : J. Terasmaa).

manière inégale et certains des blocs de glace étaient couverts d'alluvions de glacier. Après la fonte des blocs de glace, les kettles se sont formés et ont été remplis d'eau (si un fond étanche s'était formé), offrant un environnement idéal pour la préservation de matériau organique (comme du matériau paléoécologique).

Au début de la formation du lac (environ 11 000 ans BP), le niveau d'eau du lac Juusa était plus élevé qu'aujourd'hui. Une infiltration intensive d'eaux de fonte s'en est suivie, provoquant une chute du niveau du lac d'environ 10 m, ce qui a eu pour résultat le plus bas niveau d'eau vers 8 500 ans BP (Punning *et al.*, 2005, Terasmaa, 2011, Puusepp, 2011). Dans le lac Juusa, le niveau d'eau a de nouveau commencé à monter depuis 8 500 ans BP (Punning *et al.*, 2005, Terasmaa, 2011) ainsi que dans d'autres lacs de la région de la Baltique et de Suède (Saarse et Harrison, 1992) en raison des conditions humides pendant cette période (Saarse et Harrison, 1992, Yu et Harrison, 1995, Dearing, 1997, Eronen *et al.*, 1999, Ojala et Saarinen, 2002). Parallèlement, plusieurs études

(Seppä et Poska, 2004, Antonsson *et al.*, 2008, Seppä *et al.*, 2009) ont décrit le climat vers 8 000 à 4 000 ans BP comme étant chaud et sec. Pourtant, Stansell *et al.* (2017) contestent les conditions plus humides et sèches de cette période dans la région de la Baltique en se basant sur les relevés isotopiques stables du lac Nuudsaku (Estonie du Sud). Ils suggèrent qu'il y avait une hétérogénéité spatiale et saisonnière dans

les régimes pluviométriques. Cependant, notre recherche en Lettonie au lac Kūži (Hauts de Vidzeme, Lettonie centrale) démontre que le niveau du lac monte lors de la période précoce de l'Holocène (11 700 à 8 200 ans

Tableau 1 : Principaux
paramètres des lacs
étudiés.

	Surface, ha	Profondeur max, m	Profondeur moyenne, m
Lac Lohja	56,8	2,9	2,2
Lac Viitna	3,8	5,0	1,8
Lac Martiska	3,0	7,8	2,2
Lac Nõmme	15,0	7,0	3,1
Lac Verevi	12,6	11,0	3,7
Lac Juusa	3,0	5,8	3,7
Lac Kūži	6,3	8,0	3,7

BP) pour atteindre son maximum entre 8000 et 7000 ans BP et reste ensuite stable pendant plusieurs millénaires (Terasmaa *et al.*, 2013). De même, en Estonie du Nord, dans le lac Viitna, le niveau de l'eau est monté de 6 à 7 m lors de l'Holocène précoce (Punning *et al.*, 2003). Dans le lac Juusa, une faible baisse du niveau de l'eau s'est produite il y a 3300 ans lorsque, selon Saarse et Harrison (1992) et Yu et Harrison (1995), le climat était plus sec. Dans le lac Kūži, la baisse du niveau de l'eau a commencé il y a environ 2000 ans BP en même temps que l'impact humain se manifestait (Terasmaa *et al.*, 2013). Dans le lac Viitna, le niveau de l'eau a fluctué considérablement à plusieurs reprises au cours des 8000 dernières années avec un niveau maximum vers 3300 ans BP (Punning *et al.*, 2003).

La comparaison des diagrammes polliniques des lacs Viitna (Estonie du Nord), Juusa (Estonie du Sud) et Kūži (Lettonie centrale) (Koff et Kangur, 2003, Kangur, 2005, Terasmaa *et al.*, 2016), a permis de conclure que, dans la période allant environ de 11000 à 10000 ans BP, les espèces *Betula*, *Pinus* et *Poaceae* dominaient, renvoyant à un paysage semi-ouvert. Lors de cette période, le climat était très variable avec des périodes plus chaudes et d'autres plus froides. Par la suite, les paysages sont devenus plus boisés au fur et à mesure de l'essor des *Corylus*, *Ulmus* et *Alnus*. Bien que dans les sites de recherches du sud (Juusa en Estonie du Sud et Kūži en Lettonie centrale) (Kangur, 2005, Terasmaa *et al.*, 2016), le pollen *Picea* était déjà représenté il y a environ 10000 ans, en Estonie du Nord (lac Viitna) il n'apparaît qu'il y a 6000 ans (Koff et Kangur, 2003). Le pourcentage de pollen *Tilia* augmente de façon notable il y a 8300 ans BP dans les trois sites étudiés. Bien que le pollen *Quercus* apparaisse dans les sédiments lacustres des lacs Juusa et Kūži pratiquement à la même période que le pollen

Tilia, dans le lac Viitna, le pollen *Quercus* apparaît avec un retard de 2000 ans (environ 6300 ans BP) (Koff et Kangur, 2003). Au cours des 10000 dernières années, les températures moyennes annuelles et estivales étaient les plus élevées pendant l'Holocène moyen (l'Holocène moyen est défini comme la période entre 8200 et 4200 ans BP) (Antonsson et Seppä, 2007, Heikkilä et Seppä, 2010). Après le maximum thermique (depuis environ 5000 à 6000 ans BP), le refroidissement a commencé et duré jusqu'aux derniers siècles. Depuis 3000 ans BP, *Picea*, *Pinus* et *Betula* sont les espèces d'arbres dominantes (Koff et Kangur, 2003, Kangur, 2005, Terasmaa *et al.*, 2016). Il y a environ 2000 ans BP dans les zones du sud et vers 1000 ans BP en Estonie du Nord, nous pouvons détecter l'impact humain indiqué par une augmentation de la proportion de pollens *Secale* et *Poacea* (Koff et Kangur, 2003, Kangur, 2005, Terasmaa *et al.*, 2016). Cela implique des zones de bassin versant plus exposées, car elles sont devenues des paysages agricoles, ce qui entraîne des perturbations et de l'érosion, et donc affecte également les écosystèmes lacustres. D'après les résultats de l'étude des diatomées et de la composition lithologique des sédiments, nous pouvons estimer que, durant l'Holocène, le niveau trophique des lacs a tendance à passer d'un état de faible productivité à celui d'une productivité plus élevée. Un autre indicateur d'activité humaine tel que l'ouverture du paysage serait la présence des particules de charbon, qui représentent un signe clair de défrichement par le feu. Dans le lac Kūži, les particules de charbon se trouvent dans certaines strates de sédiments depuis l'an 2000 BP (Terasmaa *et al.*, 2016) et, dans le lac Juusa, dès 6000 ans BP environ (plus abondantes entre 1500 et 3000 ans BP) (Kangur, 2005).

Une période d'impact anthropique intense

Avec la révolution industrielle, la capacité des humains à altérer l'environnement naturel a augmenté de façon exponentielle. L'agriculture intensive et mécanisée, l'introduction de divers composants chimiques et la consommation accrue de ressources naturelles (Puu-sepp *et al.*, 2015, Vaasma *et al.*, 2015a) ont également eu un effet néfaste sur les lacs estoniens. Plusieurs de nos études se sont concentrées sur les lacs qui ont subi des changements d'état écologique en raison de l'influence humaine. Ces études ont plusieurs objectifs. Premièrement, établir les conséquences et les mécanismes de l'influence exercée par l'activité humaine sur les écosystèmes lacustres. Deuxièmement, comprendre comment les changements et la perturbation d'origine anthropique dans les écosystèmes lacustres sont emmagasinés dans les sédiments sous forme d'informations paléoécologiques, ce qui nous permet d'estimer l'étendue des événements préhistoriques. Enfin, déterminer le statut écologique de l'écosystème lacustre antérieurement aux perturbations et évaluer la possibilité d'un retour à l'état naturel. Nous donnons ensuite un aperçu de quatre cas d'étude. Chacun des lacs étudiés possède un contexte d'impact anthropique différent allant de l'extraction de schistes bitumineux à une mauvaise gestion du lac.

Le lac Verevi, effet des eaux résiduares urbaines

Le lac Verevi est un petit lac situé dans le sud de l'Estonie à côté de la commune d'Elva. C'est un exemple de l'impact croissant de la population envers l'écosystème du lac provoqué par les eaux résiduares urbaines et les activités de loisir intensives. La région autour du lac était peu peuplée jusqu'à l'ouverture de

la voie ferrée en 1880 et la fondation de la ville d'Elva. Depuis le début du XX^e siècle, la surveillance du lac montre une augmentation continue de l'état trophique. Durant les décennies 1970 et 1990, le rejet irrégulier d'eaux résiduares urbaines a pollué le lac, ce qui a produit un état hypertrophique dans les années 2000, caractérisé par une augmentation importante dans la production d'algues et une forte prolifération de cyanobactéries (Kangro *et al.*, 2005). Au début des années 2000, plusieurs mesures d'assainissement des lacs ont été adoptées.

Les études paléolimnologiques nous permettent de mieux comprendre les éléments qui ont eu lieu dans l'écosystème lacustre. Les vestiges de cladocères (puces d'eau), d'algues vertes, les isotopes d'oxygène et les pigments fossiles en tant qu'indicateurs de la productivité totale et des cyanobactéries, révèlent que le lac a déjà connu une période d'eutrophisation au XIX^e siècle, avant les altérations répertoriées historiquement (Koff *et al.*, 2016, Mikomägi *et al.*, 2016). Les concentrations de pigments fossiles et la quantité d'espèces de cladocères révèlent que l'eutrophisation est demeurée relativement élevée pendant toute la période allant des années 1880 à la fin des années 1970. Cela peut signifier que les données historiques de surveillance ont probablement sous-évalué l'eutrophisation d'origine anthropique. À partir des années 1970, la concentration de pigments fossiles remonte brusquement et atteint son maximum dans les années 1990, ce qui correspond à l'état hypertrophique du lac. L'accroissement de la productivité s'est aussi traduit par des précipitations authigéniques de marne lacustre suite à une photosynthèse intensive (Vandel et Koff, 2011). Les enregistrements sédimentaires montrent également les premiers signes d'un possible rétablissement après les mesures d'assainisse-

ment des années 2000. La concentration de pigments fossiles et d'espèces de cladocères indiquant une eutrophisation présente des courbes décroissantes (Koff *et al.*, 2016). Étant donné que la période de conditions écologiques en voie d'amélioration a été relativement courte dans le lac Verevi, il est trop tôt pour effectuer un bilan approfondi sur un possible rétablissement de l'écosystème lacustre.

Le lac Lohja, résultat d'une mauvaise gestion du lac

Le lac Lohja, situé dans le nord de l'Estonie, est un exemple d'une mauvaise gestion de lac. C'était initialement un petit lac d'eau claire et douce, où était présente la rare *Lobelia dortmanna* L. (figure 9), mais il a subi un changement d'état écologique et s'est dégradé. Vers la fin des années 1960, le lac est rapidement passé à un état turbide dominé par des algues (faible transparence de l'eau). Des changements se sont produits peu après la mise en vigueur des mesures de gestion du lac en 1963-1964, lorsqu'un pesticide toxique (le terpène bicyclique) et de la chaux composée de cendre de schiste bitumineux ont été utilisés pour rendre les conditions du lac propices à l'élevage de truites de mer. La tentative a été considérée comme un échec, car les truites de mer introduites ne se sont pas adaptées à l'environnement et la population de poissons initiale a disparu et a été remplacée par des carpes.

De fortes proliférations de cyanobactéries et décimations des poissons ont suivi (Mäemets, 1968).

Les études paléolimnologiques ont été réalisées afin de tester l'hypothèse selon laquelle les mauvaises mesures de gestion du lac ont causé la détérioration de l'écosystème lacustre. Curieusement, les données paléolimnologiques ont révélé que les changements vers un état trophique supérieur ont commencé considérablement plus tôt (Koff *et al.*, 2016, Marzecová *et al.*, 2017). Les indicateurs pigmentaires et liés aux cladocères révèlent une détérioration écologique à la fin des années 1930, renvoyant à un changement soudain vers un état

Figure 9 : *Lobelia dortmanna* L., lobélie aquatique. Une espèce rare présente dans des lacs oligotrophes, restée sur un sol sec après une baisse du niveau d'eau dans le lac Valgejärv, près des lacs de la région de Kurtna (photo : J. Teasmaa).

écologique eutrophique dominé par des algues (Koff *et al.*, 2016). Dans le même temps, l'augmentation de titane montre un accroissement de l'érosion du sol (Marzecová *et al.*, 2017). Cela constitue des bases nécessaires afin d'empêcher de potentielles altérations du bassin. L'analyse cartographique des anciennes cartes du bassin versant révèle plusieurs modifications dans l'affectation des sols au XX^e siècle : l'intensification du réseau de drainage (années 1930 et 1980), la déforestation (années 1940) et l'ouverture de la carrière d'argile qui arrive au lac Lohja (mi-XX^e siècle et 1990) (Koff *et al.*, 2016). Les données disponibles semblent indiquer que même si une mauvaise gestion du lac a empiré l'état écologique du lac, les principaux facteurs d'eutrophisation et de prolifération des cyanobactéries ont été les changements d'affectation des sols dans le bassin versant, qui ont été une source constante de nutriments et de turbidité grâce aux particules érodées. La perte progressive de zones humides et l'augmentation du nombre de fossés dans le bassin versant ont eu un effet plus significatif sur l'écosystème lacustre en comparaison de l'impact direct, mais à court terme, de la manipulation chimique du lac. L'étude met en évidence l'importance de l'affectation des sols du bassin versant et des perturbations causées par les fossés dans les modifications de l'écologie des petits lacs (Marzecová *et al.*, 2017). Les données paléolimnologiques n'indiquent aucun signe de rétablissement de l'état naturel d'équilibre antérieur dans le cas du lac Lohja.

Le lac Martiska, effets de l'extraction extensive des eaux souterraines

Le lac Martiska est situé à l'est de l'Estonie, dans une aire controversée où le district des lacs vierges comportant plusieurs lacs du Réseau Natura 2000 et Directive Habitat est entouré d'une

industrie lourde qui va de l'exploitation minière de schiste bitumineux et l'extraction de tourbe à l'extraction des eaux souterraines. Cette dernière est considérée comme le principal facteur affectant le lac Martiska. L'extraction des eaux souterraines (puits de captage établis en 1970) a entraîné une énorme baisse du niveau d'eau, qui a chuté jusqu'à 3,8 m, c'est-à-dire une perte de 80 % du volume d'eau du lac. Cela conduit à la disparition d'une espèce rare de macrophytes typique des lacs oligotrophes : *Isoëtes lacustris* L., *Sparganium angustifolium* Michx. and *Lobelia dortmanna* L. (Vandel *et al.*, 2016).

En dehors des graves conséquences écologiques, la baisse du niveau de l'eau et le rétablissement partiel de ce dernier ont été une occasion idéale d'étudier si l'événement a été enregistré comme un repère paléocéologique dans les sédiments lacustres. Nous avons testé deux méthodes : la distribution granulométrique des particules minérales et les analyses de macrofossiles. Lorsque la distribution granulométrique des particules minérales est utilisée, la fluctuation du niveau d'eau a laissé des signaux clairs dans les sédiments du lac : la baisse du niveau d'eau a provoqué le déplacement de matières grossières jusqu'aux zones plus profondes du lac. Grâce à la restauration du niveau d'eau, des matières plus fines ont commencé à s'accumuler à nouveau (Punning *et al.*, 2006, 2007, Vaasma *et al.*, 2015b). L'analyse de macrofossiles ne s'est pas avérée aussi instructive. Le nombre total de macrofossiles était faible et principalement d'origine terrestre. Aucun changement détectable dans les assemblages de macrofossiles n'était présent dans les carottes de sédiments qui ont été analysées (Kaljuvee, 2015). Étant donné que la population de macrophytes aquatiques est abondante dans le lac Martiska (Vandel *et al.*, 2016), la cause de la faible quantité de macro-

fossiles est peut-être liée aux intenses processus de décomposition qui peuvent aussi continuer après la sédimentation de la matière organique (Vandel, 2010). En ce qui concerne une restauration possible de l'écosystème lacustre précédent grâce au niveau d'eau en cours de rétablissement, il n'y a aucun signe positif jusqu'à présent puisque les espèces rares des lacs oligotrophes ne sont pas réapparues pour le moment (Vandel *et al.*, 2016).

Le lac Nõmme, effet de l'écoulement des eaux pendant l'exploitation minière de schiste bitumineux

Le lac Nõmme est situé dans le champ de Kames de Kurtna, à l'est de l'Estonie, dans la réserve de Kurtna et fait partie du réseau de lacs Natura 2000. C'est un petit lac d'eau dure qui a une histoire complexe en termes d'écologie car il a été fortement bouleversé par des écoulements d'eaux alcalines provenant de la mine de schiste bitumineux à travers le chenal artificiel Raudi depuis 1972. Pour autant, un léger impact anthropique avait déjà commencé plus tôt : un campement de l'armée avait été édifié aux abords du lac vers 1930 (Marzecová *et al.*, 2011). À ce jour, l'état écologique global du lac a été évalué comme étant bon.

Le signal représentant l'arrivée d'eaux de mine provenant du chenal Raudi est clairement représenté dans le sédiment du lac comme une augmentation abrupte du matériel minérogénique (Koff *et al.*, 2016). Il y a eu des changements majeurs dans la composition chimique des sédiments et dans les pigments qui indiquent des altérations sur le plan sédimentaire ainsi que dans l'état écologique. L'augmentation des concentrations de pigments au cours des années 1980 suggère des pics provisoires de productivité totale.

Les données paléoécologiques laissent entendre qu'avant l'arrivée artificielle d'eaux, la productivité globale du lac était plus faible, même s'il y a des traces de groupes de cyanobactéries (Koff *et al.*, 2016). À partir des années 1990, les paléodonnées montrent une augmentation régulière de la productivité des lacs. L'arrivée artificielle d'eaux et l'augmentation de la productivité du lac ont aussi engendré une précipitation authigénique de carbonates, qui a présenté un accroissement soudain depuis les années 1970. Récemment, la quantité d'arrivée artificielle d'eaux a diminué et on estime qu'elle va baisser encore davantage en raison de la fermeture de certaines parties des mines de schiste bitumineux (Terasmaa *et al.*, 2014). L'analyse sédimentaire a montré une quantité élevée de phosphore (un nutriment essentiel et limitant de la production primaire) dans les sédiments lacustres, tandis que la concentration dans l'eau est faible (données non publiées). À cause de la baisse du débit de l'eau et de l'augmentation de la production primaire, il y a un léger risque que le lac devienne progressivement anoxique, ce qui mènerait à des rejets de phosphore par les sédiments, et, par conséquent, à une augmentation de la productivité lacustre. C'est pourquoi, même si la surveillance du lac montre un bon état écologique, les données paléolimnologiques conseillent la prudence, en repoussant les limites de l'écosystème lacustre, des changements dans l'état stable peuvent se produire.

Conclusion

Les études paléolimnologiques réalisées par l'Institut d'Écologie de l'Université de Tallinn ont permis de dresser un aperçu du développement de petits lacs et des changements environnementaux dans la région Baltique. Durant l'Holocène, le niveau des lacs a fluctué considérablement. Il est difficile de souligner

des tendances particulières pour tous les lacs étudiés car cela suggère l'importance des conditions locales. Après le retrait du glacier continental, les espèces *Betula*, *Pinus* et *Poaceae* ont été les premières à se répandre. Par la suite, la proportion des autres arbres à feuilles caduques tels qu'*Alnus*, *Ulmus* et *Tilia*, ... a augmenté. Au cours des derniers millénaires, la déforestation et l'agriculture se sont intensifiées et ont laissé des traces dans les paysages. Au cours de ces derniers siècles, l'impact

des êtres humains sur les lacs est devenu encore plus sévère. Plusieurs lacs qui étaient autrefois habités par de rares macrophytes oligotrophes ont connu des changements dans leur état écologique. La perte d'espèce rare et la dégradation de l'écologie des lacs sont probablement irréversibles, car les états d'équilibre des lacs ont changé. Cependant, dans certains cas, les données paléolimnologiques révèlent des signes de rétablissement grâce à la baisse des perturbations anthropiques ces dernières décennies.

Références

- Antonsson K., Seppä H., 2007.** Holocene temperatures in Bohuslän, southwest Sweden: a quantitative reconstruction from fossil pollen data. *Boreas* 36: 400–410.
- Antonsson K., Chen D., Seppä H., 2008.** Anticyclonic atmospheric circulation as an analogue for the warm and dry mid-Holocene summer climate in central Scandinavia. *Clim. Past Discuss.* 4, 585–610.
- Dearing, J.A., 1997. Sedimentary indicators of lake-level changes in the humid temperate zone: a critical review. *Journal of Paleolimnology*, 18, 1–14.
- Eronen M., Hyvärinen H., Zetterberg P., 1999.** Holocene humidity changes in northern Finnish Lapland inferred from lake sediments and submerged Scots pines dated by tree-rings. *The Holocene*, 9, 569–580.
- Gasse F., Juggins S., Khelifa L.B., 1995.** Diatom-based transfer functions for inferring hydrochemical characteristics of African palaeolakes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 117: 31–54.
- Heikkilä M., Seppä H., 2010.** Holocene climate dynamics in Latvia, eastern Baltic region: a pollen based summer temperature reconstruction and regional comparison. *Boreas* 39: 705–719.
- Hutton J., 1788.** *Theory of the Earth*. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, vol. 1, Part 2, pp. 209–304.
- Ilomets M. (ed.), 1987.** *Kurtina järvestiku looduslik seisund ja selle areng* [Natural Status and Development of the Kurtina Lake District I]. Valgus, Tallinn, 234 p.
- Ilomets M. (ed.), 1989.** *Kurtina järvestiku looduslik seisund ja selle areng* [Natural Status and Development of the Kurtina Lake District II]. Valgus, Tallinn, 169 p.
- Kaljuvee L., 2015.** *Martiska järve veetaseme muutuste kajastumine setetes makrojäänustena*, in Estonian (Water-level fluctuation reflection in the sediments of lake Martiska). Tallinn University, BSc thesis, pp. 35.
- Kangro K., Laugaste R., Nõges P., Ott I., 2005.** Long-term changes and seasonal development of phytoplankton in a strongly stratified, hypertrophic lake. *Hydrobiologia*, 547, 91–103.
- Kangur M., 2005.** Palynostratigraphy of Holocene lake sediments on the Otepää Heights, southern Estonia. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. *Geology*, 54 (1), 52–68.
- Koff T., Kangur M., 2003.** *Vegetation history in Northern Estonia during the Holocene based on pollen diagrams from a small kettlehole and lake sediments*. In: Tonkov, S. (Ed.). Aspects of Palynology and Palaeoecology: Festschrift in honour of Elissaveta Bozilova (113–126). Sofia-Moscow: PENSOFT Publisher.
- Koff T., Vandel E., 2008.** Spatial distribution of macrofossil assemblages in surface sediments of two small lakes in Estonia. *Estonian Journal of Ecology*, 57 (1), 5–20.
- Koff T., Marzecová A., Vandel E., Avi E., Mikomägi A., 2014.** *Lake is not only water: signatures of environmental history and anthropogenic impact in sediments of small Estonian lakes*. IWA regional Symposium on Water, Wastewater and Environment: traditions and Culture. Patras, Greece 22–24 March 2014. Ed. Kalavrouziotis, I., Angelakis, A. 1045–1055.
- Koff T., Vandel E., Marzecová A., Avi E., Mikomägi A., 2016.** Assessment of the effect of anthropogenic pollution on the ecology of small shallow lakes using the palaeolimnological approach. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 65 (4), 221–233
- Marzecová A., Avi E., Mikomägi A., Koff T., 2017.** Ecological response of a shallow boreal lake to

biomanipulation and catchment land-use: integrating paleolimnological evidence with information from limnological surveys and maps. *Journal of Paleolimnology*, 57 (1), 1–18.

Marzecová A., Mikomagi A., Koff A., Martma T., 2011. Sedimentary geochemical response to human impact on Lake Nõmmejärv, Estonia. *Estonian Journal of Ecology*, 60 (1), 54–69.

Mikomägi A., Koff T., Martma T., Marzecová A., 2016. Biological and geochemical records of human-induced eutrophication in a small hard-water lake. *Boreal Environment Research*, 21, 513–527.

Mäemets A., 1968. *Eesti järved [Estonian lakes]*. Valgus, Tallinn, 548 pp.

Ojala A.E.K., Saarinen T., 2002. Paleosecular variation of the earth's magnetic field during the last 10 000 yr based on an annually laminated sediment of Lake Nautajärvi, central Finland. *The Holocene*, 12, 391–400.

Punning J.-M., Toots M., 1987. Kurtna järvede temperatuuri ja gaasirežiim [The temperature and gas distribution of the Kurtna lakes]. Kurtna järvestiku looduslik seisund ja selle areng [*Natural Status and Development of the Kurtna Lake District*] (Ilomets, M. ed.). Valgus, Tallinn, 149–153.

Punning J.-M., Punning K., 1987. Anioonide sisaldus Kurtna järvedes [The composition of anions of the Kurtna lakes]. Kurtna järvestiku looduslik seisund ja selle areng [*Natural Status and Development of the Kurtna Lake District*] (Ilomets, M. ed.). Valgus, Tallinn, 154–159.

Punning J.-M., Sagris A., 1993. Processes of biogeochemical matter cycle under the conditions of artificial eutrophication. *Proc. Est. Acad. Sci., Ecology*, 3 (3), 120–136.

Punning J.-M., Varvas M., 1993. Influence of natural and manmade processes of the geochemical composition of lake sediments, northeast Estonia. *Applied Geochemistry*, Supplied Issue, p. 75–77.

Punning J.-M., Ilomets M., Karofeld E., Koff T., Kozlova M., Laugaste R., Rajamäe R., Taure I., Varvas M., 1989. Tehnogeensed muutused biogeokeemilises ainerings. [Technogenical changes in biogeochemical cycle]. Kurtna järvestiku looduslik seisund ja selle areng II [*Natural Status and Development of the Kurtna Lake District II*] (Ilomets, M. ed.). Valgus, Tallinn, 14–18.

Punning J.-M., Puusepp L., 2007. Diatom assemblages in sediments of Lake Juusa, Southern Estonia with an assessment of their habitat. *Hydrobiologia*, 586, 27–41.

Puusepp L., & Punning J.-M., 2011. Spatio-temporal variability of diatom assemblages in surface sediments of Lake Peipsi. *Journal of Great Lakes Research*, 37, 33–40.

Punning J.-M., Kangur M., Koff T., Possnert G., 2003. Holocene lake-level changes and their reflection in the paleolimnological records of two lakes in northern Estonia. *Journal of Paleolimnology*, 29 (2), 167–178.

Punning J.-M., Koff T., Kadastik E., Mikomagi A., 2005. Holocene lake level fluctuations recorded in the sediment composition of Lake Juusa, southeastern Estonia. *Journal of Paleolimnology*, 34 (3), 377–390.

Punning J.-M., Terasmaa J., Vaasma T., 2006. The impact of lake-level fluctuations on the sediment composition. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 6(5–6), 515–521.

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 of Lake Martiska, Estonia. *The Holocene*, 17(1), 145–151.

Puusepp L., 2011. *Spatio-temporal Variability of Diatom Assemblages in Lake Sediments* (PhD dissertation). Tallinn: Tallinn University.

Puusepp L., Pensa M., Küttim M., Kangur M., 2015. *Use of Natural Resources*. In: Vetik, R.; Terk,

E.; Saar, E.; Kangur, M.; Lauristin, M.; Sootla, G. (Eds.). Estonian Human Development Report 2014/2015 - Escaping the Traps? (147–159). Tallinn: Estonian Cooperation Assembly.

Ramstack J.M., Fritz S.C., Engstrom D.R., Heiskary S.A., 2003. The application of a diatom-based transfer function to evaluate regional water-quality trends in Minnesota since 1970. *J. Paleolimnol.* 29, 79–94.

Saarse L., Harrison S., 1992. Holocene lake-level changes in the eastern Baltic region. In: Kaare, T., Mardiste, H., Merikalju, L., Punning, J.-M. (eds.). *Estonia. Man and Nature*. Academy of Sciences of Estonia, Estonian Geographical Society, Tallinn, 6–20.

Seppä H., Poska A., 2004. Holocene annual mean temperature changes in Estonia and their relationship to solar insolation and atmospheric circulation patterns. *Quat. Res.* 61, 22–31.

Seppä H., Bjune A.E., Telford R.J., Birks H.J.B., Veski S., 2009. Last nine-thousand years of temperature variability in Northern Europe. *Clim Past* 5: 523–535.

Stansell N.D., Klein E.S., Finkenbinder M.S., Fortney C.S., Dodd J.P., Terasmaa J., Nelson D.B., 2017. A stable isotope record of Holocene precipitation dynamics in the Baltic region from Lake Nuudsaku, Estonia. *Quaternary Science Reviews*, 175, 73–84.

Terasmaa J., 2011. Lake basin development in the Holocene and its impact on the sedimentation dynamics in a small lake (southern Estonia). *Estonian Journal of Earth Sciences*, 159–171.

Terasmaa J., Puusepp L., Marzecová A., Vandel E., Vaasma T., Koff T., 2013. Natural and human-induced environmental changes in Eastern Europe during the Holocene: a multi-proxy palaeolimnological study of a small Latvian lake in a humid temperate zone. *Journal of Paleolimnology*, 49 (4), 663–678.

Terasmaa J., Mikomägi A., Vandel E., Vaasma T., Vainu M., Heinsoo M., 2014. *Hydrotechnogenical influence of the oil shale mines to the water quality of the natural lakes in the Kurtina Lake District, Estonia.* In 2nd International Conference – Water Resources and Wetlands, 11–13 September, 2014 Tulcea (Romania), Proceedings (Gâstescu, P., Marszelewski, W., Bretcan, P., eds), pp. 181–188.

Terasmaa J., Puusepp L., Vandel E., Marzecová A., Koff T., Vaasma T., Kangur M., 2016. Main drivers affecting the Holocene sedimentary record - implications from small lake in Latvia. *Baltica*, 29 (1), 63–77.

Vaasma T., Vandel E. & Vetsa M., 2015a. *Residues.* Vetik, R., Terk, E., Saar, E., Kangur, M., Lauristin, M., Sootla, G. (Eds.). Estonian Human Development Report 2014/2015 – Escaping the Traps? (160–170). Tallinn: Estonian Cooperation Assembly.

Vaasma T., Terasmaa J., Vandel E., 2015b. Changes in sedimentation and aquatic vegetation caused by drastic lake-level fluctuation. *Lakes, reservoirs and ponds*, 9 (1), 29–42.

Vandel E., 2010. Effect of vegetation on alpha cellulose decomposition in littoral lake sediments. *Aquatic Botany*, 93 (3), 179–184.

Vandel E., Koff T., 2011. Anthropogenically induced changes in the sedimentation processes in the littoral zone of Lake Verevi, South Estonia. *Estonian Journal of Ecology*, 60 (3), 167–182.

Vandel E., Vaasma T., Koff T., Terasmaa J., 2016. Impact of water-level changes to aquatic vegetation in small oligotrophic lakes from Estonia. *Lakes, reservoirs and ponds*, 10 (1), 9–26.

Varvas M., Punning J.-M., 1993. Use of the 210 Pb method in studies of the development and human-impact history of some Estonian lakes. *The Holocene*, vol. 3, nr 3, p. 34–44.

Yu G., Harrison S. P., 1995. Holocene changes in atmospheric circulation patterns as shown by lake status changes in northern Europe. *Boreas*, 24, 260–268.