



Dynamiques environnementales

Journal international de géosciences et de l'environnement

43-44 | 2019

Un patrimoine unique à partager et à protéger

Rôle fonctionnel, dynamiques écologiques et nécessité de gestion des communautés d'isoétides dans les lacs et étangs du littoral aquitain

Isoetids in French Atlantic lakes : functions, dynamics and the need for conservation

Vincent Bertrin, Sébastien Boutry, Alain Dutartre, Gwilherm Jan, Sylvia Moreira et Cristina Ribaudó



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/dynenviron/5819>

DOI : 10.4000/dynenviron.5819

ISSN : 2534-4358

Éditeur

Presses universitaires de Bordeaux

Édition imprimée

Date de publication : 6 octobre 2019

Pagination : 202-224

ISSN : 1968-469X

Référence électronique

Vincent Bertrin, Sébastien Boutry, Alain Dutartre, Gwilherm Jan, Sylvia Moreira et Cristina Ribaudó, « Rôle fonctionnel, dynamiques écologiques et nécessité de gestion des communautés d'isoétides dans les lacs et étangs du littoral aquitain », *Dynamiques environnementales* [En ligne], 43-44 | 2019, mis en ligne le 01 avril 2022, consulté le 17 septembre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/5819> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/dynenviron.5819>

Ce document a été généré automatiquement le 17 septembre 2022.



Creative Commons - Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International - CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Rôle fonctionnel, dynamiques écologiques et nécessité de gestion des communautés d'isoétides dans les lacs et étangs du littoral aquitain

Isoetids in French Atlantic lakes : functions, dynamics and the need for conservation

Vincent Bertrin, Sébastien Boutry, Alain Dutartre, Gwilherm Jan, Sylvia Moreira et Cristina Ribaudó

Introduction

Les macrophytes

- 1 Les macrophytes¹ contribuent considérablement au fonctionnement des écosystèmes aquatiques en influençant de nombreux processus chimiques et physiques et en participant à la structuration des habitats dans les plans d'eau et les cours d'eau (Jeppesen *et al.*, 2012). Étant capables de contrôler directement ou indirectement la disponibilité des ressources pour eux et les autres organismes en modifiant leur biotope, ils sont considérés comme des organismes-ingénieurs (Jones, Lawton & Shachak, 1997). En tant que producteurs primaires, ils sont source de matière et d'énergie pour la plupart des organismes qui composent le réseau trophique d'un écosystème aquatique. Leur métabolisme peut modifier significativement la qualité physico-chimique de l'eau et des sédiments par les produits issus de la photosynthèse et de la respiration, mais également par les fluctuations des teneurs en nutriments (azote et phosphore) consommés durant leur existence, puis par la matière organique restituée lors de leur senescence (Takamura *et al.*, 2003). Leurs racines, tiges et feuilles fixent les sédiments et les particules en suspension dans l'eau et peuvent contribuer à stabiliser les fonds et les rives dans certaines conditions hydrodynamiques intenses

(Oguz *et al.*, 2013). Enfin, ils constituent des habitats pour la faune aquatique et terrestre (Carpenter & Lodge, 1986). Ainsi, les macrophytes sont des acteurs importants dans le fonctionnement des milieux aquatiques car ils interviennent dans les dynamiques géomorphologiques, hydrodynamiques et biogéochimiques. Facteurs de diversification des habitats aquatiques, l'étude de leurs communautés fournit également des informations précieuses sur l'état écologique de milieux et ils sont utilisés comme bioindicateurs² dans les programmes nationaux et européens pour la surveillance et la gestion des masses d'eau (Chauvin *et al.*, 2014).

Les lacs peu profonds colonisés par les isoétides

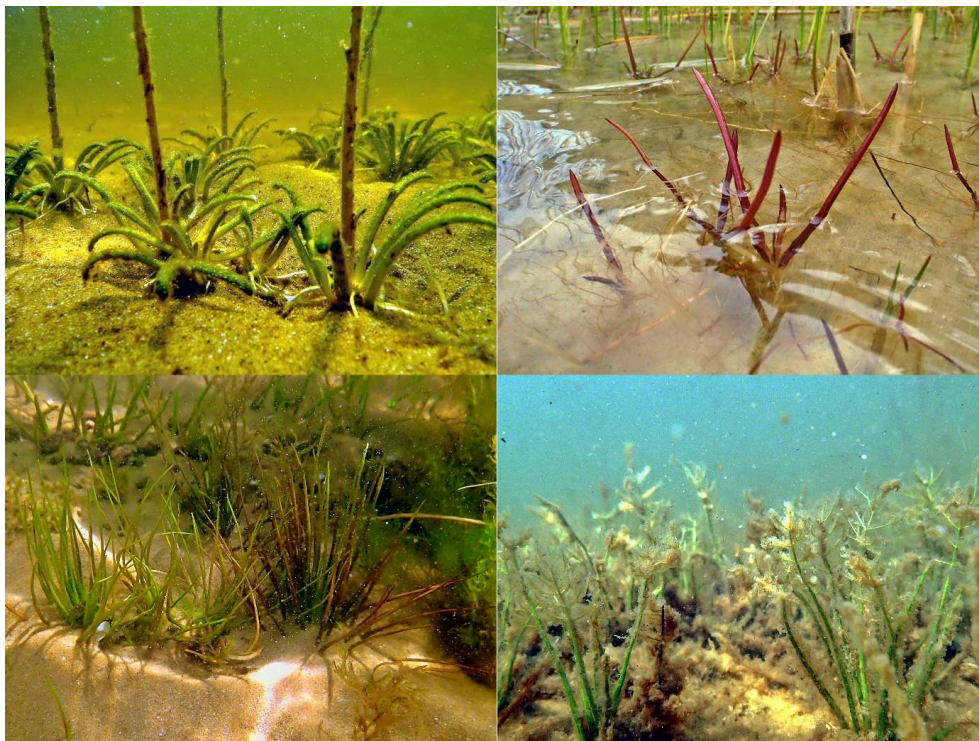
- 2 Les lacs dits "peu profonds" représentent une catégorie de plans d'eau dont la colonne d'eau est fréquemment mélangée au cours de l'année, la stratification thermique estivale y est instable et facilement éliminée par le vent (lacs polymictiques) (Scheffer, 2004). Ils sont nombreux et largement distribués du nord au sud de l'Europe, de la Finlande à l'Espagne (Moss *et al.*, 2003). Leur profondeur moyenne est généralement inférieure à 3 m, leur superficie s'étend de quelques hectares à plus de 100 km². Les lacs peu profonds sont caractérisés par des interactions eau-sédiments intenses et par des proportions importantes de leur superficie potentiellement colonisable par les macrophytes, ce qui les différencie de leurs homologues dits "profonds" (Havens *et al.*, 2001).
- 3 Dans le sud-ouest de la France, une quinzaine de plans d'eau naturels peu profonds s'étend le long de la côte Atlantique au pied des dunes littorales, de l'estuaire de la Gironde au nord à celui de l'Adour au sud. Il s'agit de la chaîne des lacs et étangs du littoral aquitain. Quatre d'entre eux sont caractérisés par des superficies particulièrement élevées, atteignant 60 km² pour le lac de Carcans-Hourtin, ce qui en fait le plus grand lac naturel d'eau douce sur le territoire métropolitain. Ces eaux sont pauvres en calcium (<15 mg/L), leur alcalinité est relativement faible (<1 meq/L) et les sédiments sont largement dominés par des sables éolisés³ constituant les dunes côtières (Capdevielle, 1979 ; Cellamare, 2009). Ces plans d'eau sont le lieu de nombreux usages récréatifs (chasse, pêche, nautisme, baignade, etc.), notamment lors de la période de forte activité touristique estivale.
- 4 Ces lacs ont la particularité d'abriter des végétaux aquatiques protégés, rares et menacés, tels que la Lobélie de Dortmann (*Lobelia dortmanna* L.), le Faux Cresson de Thore (*Caropsis verticillato-inundata* (Thore) Rauschert) ou l'Isoète de Bory (*Isoetes boryana* Durieu), endémique en France de ces lacs. Avec la Littorelle à une fleur (*Littorella uniflora* (L.) Asch.), ces espèces appartiennent à la communauté d'isoétides (figure 1), caractérisée par des plantes pérennes de faible hauteur, aux feuilles épaisses et rigides en forme de rosette basale, dotées d'un système racinaire particulièrement développé (Hutchinson, 1975). Cette situation géographique est atypique car les isoétides sont généralement distribuées dans des lacs des régions boréo-atlantiques du nord de l'Europe (Murphy, 2002). Elles composent des pelouses littorales dites "à littorelles" (du nom français d'une des espèces qui les constituent). Elles colonisent généralement des sédiments sableux à des profondeurs ne dépassant pas quarante ou cinquante centimètres, mais il est possible de les observer à des profondeurs pouvant atteindre deux à trois mètres (Dutartre, 2007). Ces espèces se caractérisent également par un très faible taux de croissance. Ceci leur permet de se développer dans des

milieux pauvres en nutriments (oligotrophes), tout en limitant fortement leur capacité de résilience en cas de dégradation des individus ou de leur habitat (Smolders, Lucassen & Roelofs, 2002). Leur déclin observable dans les lacs correspond à un processus naturel relativement lent lié à la trajectoire des successions végétales conditionnée par l'augmentation du niveau trophique menant au comblement naturel de ces écosystèmes lenticques (Dierssen, 1981). Ce phénomène naturel est fortement intensifié par les activités humaines (Arts, 2002), les principales menaces pour ces espèces étant l'eutrophisation, l'acidification, l'alcalinisation, les dépôts de matières organiques, les modifications du niveau des eaux et la destruction physique des écosystèmes littoraux lacustres (Baastrup-Spohr, Møller & Sand-Jensen, 2016).

Les enjeux de gestion liés aux isoétides dans les lacs

- 5 Espèces de petite taille, beaucoup moins visibles que les grands macrophytes des rives comme les roseaux, les isoétides sont négligées, voire totalement méconnues du public (Dutartre, 2007). Utile dans l'évaluation de l'état écologique des plans d'eau, le suivi de leurs dynamiques spatio-temporelles peut contribuer à l'établissement des "bilans de santé" réguliers de ces lacs dans le contexte du changement global. De même, la détermination des conditions environnementales locales permettant d'expliquer, voire prédire, la présence et le maintien de ces plantes dans les zones littorales des lacs à une échelle relativement fine, est essentielle à la mise en œuvre de stratégies de conservation, voire de restauration, de ces espèces à forte valeur patrimoniale. Enfin, le rôle fonctionnel de ces plantes dans les processus biogéochimiques qui conditionnent la qualité des eaux et des sédiments dans les habitats aquatiques littoraux, est encore insuffisamment connu. Ainsi, des compléments de connaissance restent indispensables à fournir pour permettre une gestion plus pertinente des lacs et de la flore aquatique qu'ils abritent. Les résultats présentés dans cet article sont extraits et adaptés de travaux réalisés par INRAE (ex-Irstea) dans le cadre d'un post-doctorat et d'un doctorat financés par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (Ribaud *et al.*, 2015 ; Ribaud *et al.*, 2017 ; Bertrin *et al.*, 2018 ; Bertrin, 2018).

Figure 1 : Les espèces appartenant à la communauté d'isoétides : Lobélie de Dortmann (*Lobelia dortmanna*) (en haut à gauche), Littorelle à une fleur (*Littorella uniflora*) (en haut à droite), l'Isoète de Bory (*Isoetes boryana*) (en bas à gauche) et le Faux Cresson de Thore (*Caropsis verticillato-inundata*) (en bas à droite). Photos : Vincent Bertrin



Les isoétides, espèces-ingénieurs des plans d'eau

- 6 Les pelouses à isoétides présentent des traits biologiques spécifiques contribuant au bon fonctionnement des biotopes qu'elles occupent. Ces petites plantes pérennes possèdent une forte capacité d'oxygénation du sédiment, conséquence de leur profond enracinement dans le sable (jusqu'à 20 cm de profondeur) (Roelofs, Schuurkes & Smits, 1984). Leur présence a donc des effets positifs sur l'oxygénation et la rétention du fer et du phosphore (Møller & Sand-Jensen, 2008). Par ailleurs, leur présence, et celle de leurs racines aux facultés oxydantes, pourraient avoir des effets importants de rétention du méthane (un des gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement climatique) naturellement produit dans les couches plus profondes du sédiment (Ribaudo *et al.*, 2011). De même, les communautés bactériennes présentes sur le biofilm des feuilles des isoétides, ainsi que sur les macro-algues characées que l'on retrouve souvent associées, pourraient consommer une partie du méthane produit dans le sédiment et donc réduire son transfert net vers l'atmosphère (Yoshida *et al.*, 2014). La température des eaux des lacs aquitains étant tempérée (>16°C d'avril à octobre, Laplace-Treytoure & Moreira, 2016), des activités d'oxydation du méthane peuvent perdurer durablement dans les sites peu profonds où sont installées les isoétides (Yvon-Durocher *et al.*, 2011).

Mesure de flux benthiques d'oxygène et de carbone dans les pelouses à isoétides

- 7 Pour tester les effets de la présence des isoétides sur les dynamiques de l'oxygène (O_2), du méthane (CH_4) et du carbone inorganique dissous (DIC, dont dioxyde de carbone, CO_2), des cycles d'incubation ont été effectués *in situ* sur des pelouses à isoétides totalement immergées. Les incubations se font à l'aide des chambres benthiques, c'est-à-dire en confinant pendant une durée connue la colonne d'eau et le sédiment végétalisé à l'aide d'une cloche en plexiglas transparent. Pendant l'incubation, le microcosme à l'intérieur de la chambre (l'ensemble des plantes, bactéries, biofilm et phytoplancton) évolue en fonction des conditions naturelles du milieu (lumière, température, chimie de l'eau). En effectuant des prélèvements dans la chambre au début et à la fin de l'incubation, il est donc possible de mesurer le fonctionnement de ce microcosme et de rapporter les changements mesurés de la chimie de l'eau à la présence/absence des plantes. Cette mesure des dynamiques des gaz et des nutriments *in situ* à l'aide de chambres benthiques constitue une approche innovante d'étude de la communauté d'isoétides, jusque-là uniquement examinées en laboratoire en conditions contrôlées.
- 8 Dans cette étude, 82 incubations ont été effectuées sur 8 sites entre mai 2013 et juillet 2014 sur les lacs de Lacanau et de Cazaux-Sanguinet. Chaque cycle de mesure se compose de 3 chambres de 9L chacune, installées sur sédiment végétalisé et de 3 chambres sur le sol nu ; les incubations sont réalisées de jour, au maximum du rayonnement solaire (entre 11h et 16h), et de nuit (entre 23h et 4h). Les incubations de nuit permettent de soustraire l'effet de la photosynthèse des producteurs primaires (Figure 2). Au terme du cycle jour/nuit, des prélèvements⁴ des plantes sont également effectués pour l'analyse des traits morphologiques et déterminer la biomasse moyenne sur chaque chambre. De plus, des carottes de sédiment sont prélevées sur chaque zone étudiée pour analyser le contenu de matière organique (technique de perte au feu ou PAF). Les échantillons d'eau et de végétaux sont analysés en laboratoire dans les 48h suivant le prélèvement. Les échantillons aqueux sont analysés par polarimétrie, chromatographie à phase gazeuse et ionique (Ribaudou *et al.*, 2017).
- 9 Les résultats des incubations sont exprimés en terme de flux benthiques, c'est-à-dire que la variation en concentration de chaque gaz dans la chambre est calculée par rapport à la superficie de sol étudiée et à la durée de l'incubation (par ex. : $\text{mol } O_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). On parle de flux positif quand le système benthique (plante + sédiment + biofilm) rejette un soluté du sédiment vers la colonne d'eau (par exemple, la photosynthèse génère un flux positif d'oxygène pendant le jour), et négatif lorsque le système benthique retient un soluté de la colonne d'eau (par exemple, la photosynthèse génère un flux négatif de carbone pendant le jour car les plantes l'assimilent).

Figure 2 : En haut : Mise en place des chambres benthiques : l'installation se fait en apnée (juin 2013). En bas : Chambre benthique en cours d'utilisation sur substrat végétalisé (à gauche) et sur sol nu (à droite). Les isoétides sont souvent recouvertes par une couche épaisse de biofilm, qui abrite des micro-algues, des bactéries, des champignons, des micro-invertébrés. Le sol nu, constitué essentiellement par du sable, est souvent recouvert par une couche de micro-algues. Photos : Gwilherm Jan, Cristina Ribauda



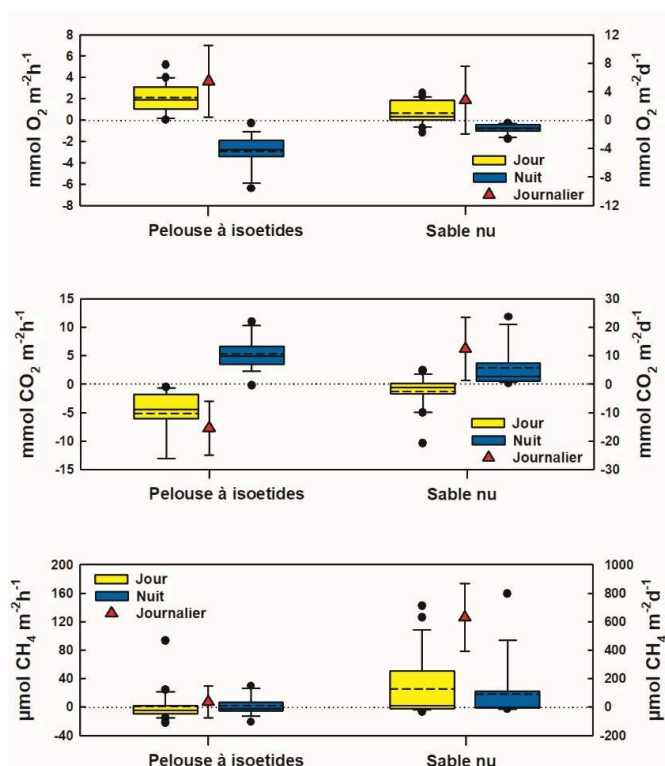
Les isoétides oxygènent les sédiments des lacs et retiennent les gaz à effet de serre

- 10 Les milieux colonisés par les isoétides, généralement peu profonds (<1,5 m) et agités par l'action des vagues, présentent une très faible accumulation de matière organique dans le sédiment, comprise entre 0,2 et 1,1 % PAF. Les sédiments y sont sableux, très clairs et comportent parfois des concrétions de fer et de sable (*alios*).
- 11 La communauté d'isoétides étudiée était principalement constituée par *Lobelia dortmanna* et *Littorella uniflora* à Lacanau (formant une biomasse entre 29±42 et 61±41 g de poids sec par m²), alors que les chambres ont été positionnées sur des pelouses monospécifiques à Lobélie à Cazaux-Sanguinet (entre 31±21 et 54±15 g de poids sec par m²). Des macro-algues characées (principalement *Chara fragifera* M.C.Durieu de Maisonneuve et *Nitella confervacea* (Bréb.) A.Braun ex Leonh.) étaient très souvent présentes dans les zones de pelouses, ainsi que d'autres macrophytes tels que *Juncus bulbosus* L. et *Baldellia ranunculoides* (L.) Parl. Les characées constituaient souvent une grande proportion de la biomasse totale, avec des valeurs comprises entre 14±22 et 51±32 g de poids sec par m².
- 12 Les eaux des sites étudiés sont très oxygénées et présentent des concentrations faibles en azote et phosphore ; la pénétration de la lumière au fond est très bonne pendant les incubations. Le milieu est généralement neutre (pH de 7,1 à 7,8 le jour et la nuit) et la conductivité assez faible (<250 et <190 $\mu\text{S cm}^{-1}$, respectivement à Lacanau et à Cazaux-

Sanguinet). Les concentrations dans l'eau en méthane (inférieures à 1 μM) ainsi qu'en ammonium (inférieures à 6 μM) sont très faibles par rapport à celles reportées dans d'autres études concernant des lacs peu profonds de milieux tempérés (Bolpagni *et al.*, 2007 ; Ribaud *et al.*, 2012).

- 13 Les résultats des incubations effectuées sur les isoétides ont montré que ces pelouses constituent un système autotrophe, c'est-à-dire un système où les macrophytes, sur une base journalière, assimilent le carbone de la colonne d'eau et le séquestrent sous forme de biomasse (flux journaliers négatifs, figure 3).

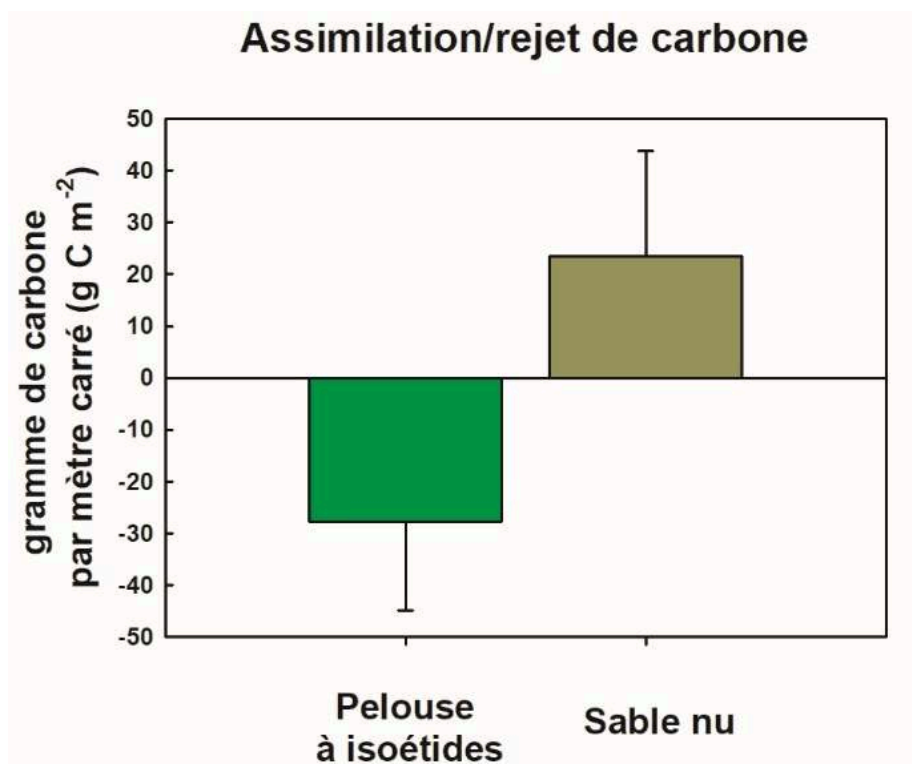
Figure 3 : Les résultats des incubations effectuées sur les isoétides (à gauche) et sur le sol nu non-végétalisé (à droite). Les flux diurnes (barres jaunes), nocturnes (barres bleues) et journaliers (points rouges) d'oxygène dissous (en haut), de dioxyde de carbone (au milieu) et de méthane (en bas) sont reportés (modifiée de Ribaud *et al.*, 2017)



- 14 Cette assimilation de carbone est associée à un rejet simultané important d'oxygène dans la colonne d'eau et dans le sédiment (flux journaliers généralement positifs) : la quantité d'oxygène rejetée dans l'eau reste cependant mineure, d'un point de vue stœchiométrique, par rapport au carbone fixé par les feuilles. Il est donc très probable qu'une grande fraction de l'oxygène produit par les plantes soit transportée dans le sédiment depuis les racines, comme déjà reporté dans plusieurs études effectuées en laboratoire (Roelofs *et al.*, 1984 ; Sand-Jensen *et al.*, 2005). Le principal résultat de ce transfert d'oxygène au sédiment est visiblement l'annulation des émissions de méthane et plus généralement de carbone (flux négatifs ou égal à zéro dans les pelouses, Figures 3 et 4) par rapport au sédiment non végétalisé qui rejette du carbone dans l'eau.
- 15 En revanche, nos incubations n'ont pas mis en évidence des différences significatives dans l'assimilation d'azote inorganique par les plantes. Il est évident que les micro-algues présentes dans le biofilm sur le sable non végétalisé contribuent aussi à la fixation de l'azote dans la couche superficielle du sédiment. Cependant, il a été

démonstré que la présence des racines des plantes contribue d'une manière plus complexe aux dynamiques de l'azote, notamment sur les processus couplés de nitrification-dénitrification, qui ont pu être quantifiés dans une étude suivante (Benelli *et al.*, 2019).

Figure 4 : Assimilation du carbone par les isoétides et rejet depuis le sédiment non végétalisé pendant la période végétative (de mai à septembre, 150 jours). Le bilan exprime la somme des flux de CO₂ et CH₄ (modifiée de Ribaudou *et al.*, 2017)



Dynamiques écologiques des isoétides sur le long terme

- 16 Les suivis réguliers des peuplements de macrophytes dans les plans d'eau sur de longues durées restent relativement rares (Carrel, Dutartre & Roger, 2010). L'utilisation de données historiques est fréquemment de mise en œuvre complexe, sauf dans le cas où les mêmes méthodes de suivis ont été appliquées durant les suivis. Les lacs et étangs naturels du littoral aquitain ont bénéficié de suivis discontinus depuis les années 1960. Différentes méthodologies ont alors été mises en application, mettant en jeu diverses approches d'observation, de localisation et d'évaluation des abondances des macrophytes *in situ*, rendant parfois difficile la comparaison des résultats obtenus durant cette période. Par ailleurs, depuis le début des années 1980, les macrophytes de ces plans d'eau ont également fait l'objet de suivis sur l'ensemble de leur périmètre, notamment dans le cadre d'études menées par le Cemagref-Irstea à l'aide d'un protocole stabilisé. Ces suivis, soutenus par le syndicat mixte Géolandes et l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, permettent de procéder à des analyses régulières des dynamiques des communautés d'espèces communes, patrimoniales et exotiques à caractère envahissant, afin d'identifier les processus écologiques en cours depuis les quarante

dernières années, pouvant ainsi contribuer à l'orientation des décisions prévisionnelles de gestion.

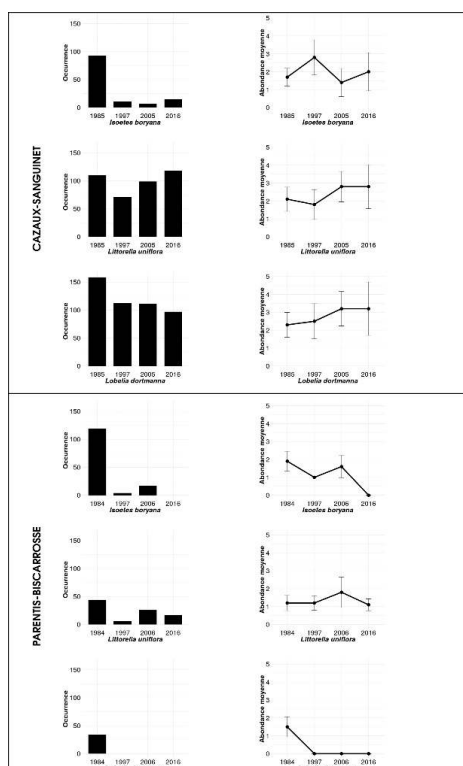
Depuis quarante ans, une unique méthodologie de terrain

- 17 Le principe général de ce protocole est l'observation directe de la végétation aquatique sur l'ensemble des rives du plan d'eau le long de secteurs consécutifs d'une longueur identique, généralement de 100 m (Dutartre, Delarche & Dulong, 1989 ; Bertrin, 2018). Les limites de ces secteurs ont été positionnées pour la mise en œuvre des premiers relevés réalisés au milieu des années 1980 et n'ont pas été modifiées depuis. Ces limites font maintenant l'objet d'un géoréférencement. Sur chaque secteur, un relevé global de la végétation aquatique est effectué depuis la bordure des eaux, incluant généralement la zone mouillée par les vagues sur la rive, jusqu'à une profondeur maximale de 1 m vers le large. Pour chaque secteur, les taxons repérés sont répertoriés (détermination à l'espèce dans la plupart des cas) et une abondance relative est donnée à chacun d'entre eux (indice de 1 à 5). Ces observations de terrain réalisées à pied, ou depuis une embarcation selon l'accessibilité des biotopes, sont effectués sur l'ensemble du périmètre des plans d'eau, soit plus de 300 secteurs de rives étudiés pour chaque lac (Dutartre *et al.*, 1989 ; Dutartre, Leveau & Moreau, 1997 ; Bertrin *et al.*, 2007 ; Bertrin *et al.*, 2012 ; Bertrin, 2018).

Un déclin régulier des isoétides dans les lacs aquitains

- 18 Les occurrences et abondances relatives moyennes des isoétides au fil du temps dans les lacs de Cazaux-Sanguinet de Parentis-Biscarrosse sont présentées dans la figure 5.

Figure 5 : Occurrences et abondances relatives moyennes de trois espèces d'isoétides dans les lacs de Cazaux-Sanguinet (total de 323 secteurs de rives étudiés) et de Parentis-Biscarrosse (total de 323 secteurs de rives étudiés) (modifiée de Bertrin, 2018)



- 19 Les occurrences d'*Isoetes boryana* et de *Lobelia dortmanna* diminuent fortement depuis les années 1980 dans ces deux lacs. Dans le lac de Cazaux-Sanguinet, *Isoetes boryana* se maintient actuellement dans une dizaine de secteurs avec de faibles abondances. Le nombre de secteurs de rives dans lesquels cette espèce n'a plus été observée depuis 1985 s'élève à 78. Depuis 1984, cette réduction atteint 123 secteurs de rives dans le lac de Parentis-Biscarrosse, dont une trentaine entre 2006 et 2016, date à partir de laquelle cette espèce n'a plus été observée. Néanmoins, il semble qu'elle persiste dans quelques stations dans ce lac (A. Le Fouler, CBNSA, com. pers.). *Lobelia dortmanna* n'est plus observée dans le lac de Parentis-Biscarrosse depuis 1984. Dans le lac de Cazaux-Sanguinet, les occurrences de cette espèce ont fortement régressé avec une perte de 62 secteurs de rives colonisés depuis 1985. Elle se maintient dans 150 secteurs (soit environ 50 % des secteurs étudiés) mais une perte constante de sites colonisés observée depuis est préoccupante. Seule l'abondance relative moyenne augmente légèrement, montrant une densification locale des populations. Enfin, les populations de *Littorella uniflora* restent relativement stables dans les lacs étudiés. Toutefois, cette espèce n'est présente que dans une vingtaine de secteurs de rives dans le lac de Parentis-Biscarrosse.
- 20 La figure 6 permet de visualiser la distribution et la dynamique de *Lobelia dortmanna* et d'*Isoetes boryana* sur les rives du lac de Cazaux-Sanguinet entre 1985 et 2016. La plupart des sites concernés par la régression des isoétides se situent sur les rives orientales des lacs. Toutes les espèces d'isoétides ont disparu dans une quarantaine de secteurs de rives dans les lacs de Cazaux-Sanguinet et de Parentis-Biscarrosse depuis les années 1980. L'analyse de la composition spécifique des secteurs où elles ont disparu au cours du temps (figure 7), montre également une régression notable des roselières à

Phragmites australis (Cav.) Trin. Ex Steud. et une progression relativement forte de certaines espèces exotiques (*Ludwigia* spp., *Lagarosiphon major* (Ridl.) Moss et *Sagittaria graminea* Michx.) et de *Juncus bulbosus* L., espèce indigène présente sous une forme végétative submergée. Ces variations dans l'occurrence et l'abondance de ces espèces sont cohérentes avec celles observées sur la majorité des rives de ces lacs.

Figure 6 : Dynamique de *Lobelia dortmanna* et d'*Isoetes boryana* dans le lac de Cazaux-Sanguinet entre 1985 et 2016 (Base Aérienne 120 exclue) (modifiée de Bertrin, 2018)

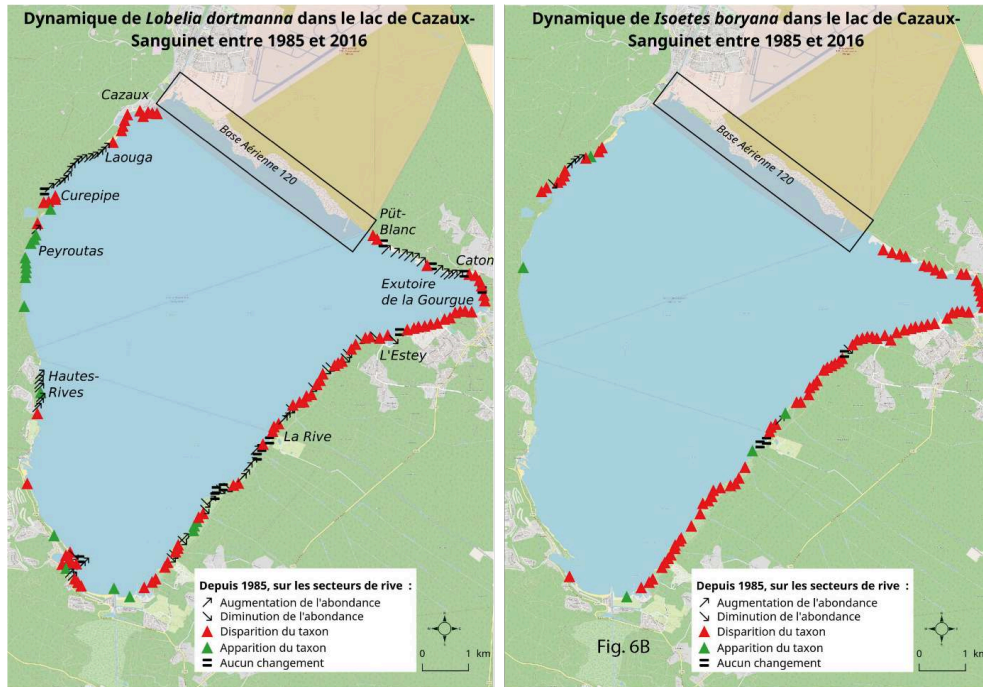
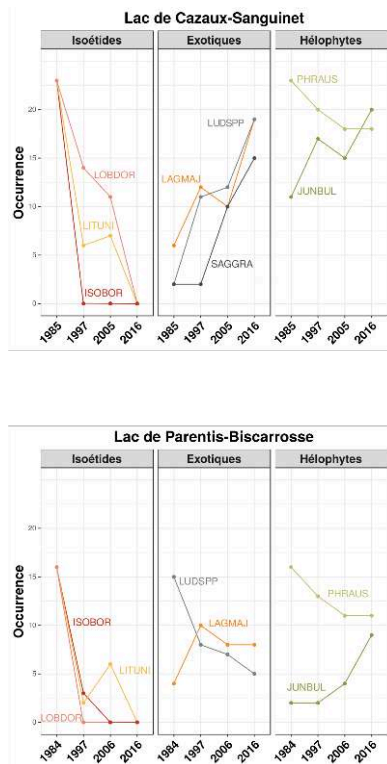


Figure 7 : Occurrences d'*Isoetes boryana* (ISOBOR), *Lobelia dortmanna* (LOBDOR), *Littorella uniflora* (LITUNI), *Ludwigia* spp. (LUDSPP), *Lagarosiphon major* (LAGMAJ), *Sagittaria graminea* (SAGGRA), *Phragmites australis* (PHRAUS) et *Juncus bulbosus* (JUNBUL), dans les secteurs de rives où *Isoetes boryana*, *Lobelia dortmanna* et *Littorella uniflora* ont toutes disparu depuis les années 1980 dans le lac de Cazaux-Sanguinet (n=23) et de Parentis-Biscarrosse (n=16) (modifiée de Bertrin, 2018)



- 21 Les lacs médocains de Carcans-Hourtin et de Lacanau ont fait l'objet d'une unique campagne de relevés en 2011 à l'aide de la méthodologie des secteurs de rives (Bertrin *et al.*, 2012), ne permettant pas la même analyse de la dynamique temporelle des isoétides que pour les lacs landais. En 2011, *Lobelia dortmanna* était présente dans 25 % des secteurs de rives étudiés, avec une abondance relative moyenne proche de 2 (rares pieds) et une distribution relativement homogène entre les rives occidentales et orientales des deux lacs. L'analyse des relevés phytosociologiques de 1963-66 et 2006 réalisée par Clément & Aidoud (2009) indique qu'aucune tendance négative n'a été observée durant 40 ans sur les espèces et habitats rares et protégés des lacs médocains, compte tenu de leur état et de leur vigueur. Cependant, ce constat s'appuie sur des observations réalisées uniquement au niveau des rives orientales de ces lacs. D'autres types de relevés permettent également d'évaluer l'état des colonisations des isoétides dans les lacs médocains. Le tableau 1 présente différentes observations et mesures réalisées sur les isoétides à l'aide de 60 quadrats⁵ localisés dans le lac de Lacanau en juillet 2013 et 2014 (Bertrin, 2018).

Tableau 1 : Occurrence (Occ.), nombre moyen d'individus, hauteur moyenne des individus et recouvrement moyen de trois taxons d'isoétides observés dans 60 quadrats (1 m²) réalisés en 2013 et 2014 dans le lac de Lacanau (modifié de Bertrin *et al.* 2018b)

Taxon	Occ.	Nombre moyen par m ² (min-max)	Hauteur moyenne par m ² (cm) (min-max)	Recouvrement moyen par m ² (%) (min-max)

<i>Caropsis verticillato-inundata</i>	12	-	5,2 ±1, 2(3 – 7)	13,5 ±13, 6(5 – 50)
<i>Littorella uniflora</i>	30	-	5 ±1, 6(2 – 8)	12,0 ±10, 3(0, 5 – 35)
<i>Lobelia dortmanna</i>	59	27,8 ±28, 1(1–145)	4,7 ±1, 9(2 – 15)	11,2 ±8, 5(0, 5 – 50)

- 22 En 1967, Vanden Berghen (1969) signalait des recouvrements d'isoétides allant de 10 à 75 % sur substrat sableux en été sur les rives orientales des lacs, à des profondeurs comprises entre 0,3 et 1m, notamment dans les roselières peu denses à *Schoenoplectus pungens* (Vahl) Palla. Il indiquait également des densités particulièrement élevées des hampes florales d'*Isoetes boryana* et de *Lobelia dortmanna* (de 78 à 137 hampes au m² dans le lac de Cazaux-Sanguinet en juillet 1967), densités supérieures à celles présentées dans le tableau 1. Déjà, en 1997, Dutartre *et al.* (1997) précisait que ces espèces avaient beaucoup souffert des aménagements humains, de l'envasement de certains sites, de la pollution des eaux et des modifications des biotopes. Ces plantes étaient néanmoins encore présentes en populations plus ou moins abondantes, créant des prairies de quelques m².
- 23 Ce déclin des isoétides dans les lacs du littoral aquitain est également observé dans les lacs du nord de l'Europe depuis plusieurs décennies (Arts, 2002 ; Smolders *et al.*, 2002 ; Baastrup-Spohr *et al.*, 2016). À ce jour, il est encore difficile d'en déterminer la cause exacte, résultant probablement d'une combinaison complexe de facteurs. Dans les lacs du littoral aquitain, la compétition interspécifique avec les espèces exotiques à caractère envahissant pourrait participer à la raréfaction de ces plantes. Cependant, des résultats obtenus à partir d'estimations des cooccurrences des plantes dans des relevés effectués en 2013 et 2014 à différentes échelles dans le lac de Lacanau (de plusieurs hectares dans les secteurs de rives à 625 cm² dans les cellules de quadrat⁶), indiquent que les espèces exotiques et les espèces patrimoniales sont rarement observées simultanément (Bertrin, 2018). À titre d'exemple, dans le lac de Lacanau, les isoétides n'ont jamais été observées simultanément avec l'espèce de jussie *Ludwigia peploides* aux différentes échelles étudiées. La qualité physicochimique (pH, alcalinité) des eaux et le niveau trophique des lacs étant relativement stables (Laplace-Treyture & Prévost, 2014 ; Ribaud *et al.*, 2014 ; Moreira *et al.*, 2015 ; Laplace-Treyture & Moreira, 2016 ; Ribaud *et al.*, 2017), les sédiments étant majoritairement pauvres en matière organique (Ribaud *et al.*, 2016), les diverses altérations anthropiques de l'hydromorphologie des zones littorales lacustres pourraient être la principale menace susceptible d'impacter fortement la communauté d'isoétides.

Prédire la distribution potentielle des isoétides pour orienter les décisions de gestion

- 24 Les modèles de répartition spatiale des plantes sont de plus en plus utilisés dans les stratégies de gestion des écosystèmes pour estimer, expliquer et prédire les changements dans la localisation géographique des espèces et des communautés (Guisan *et al.*, 2013). Ces modèles sont généralement applicables à large échelle (e.g. échelle régionale) pour déterminer si une espèce est présente ou non dans plusieurs

lacs. Néanmoins, pour la mise en œuvre d'une gestion opérationnelle de terrain à l'échelle d'un plan d'eau ou d'une partie d'un plan d'eau, un degré de précision géographique plus fin que l'échelle régionale ou du bassin versant est nécessaire (Dutartre & Menozzi, 2008). La détermination *in situ* des habitats favorables au développement de communautés d'intérêt patrimonial telles que les isoétides, pourraient donc notablement contribuer aux stratégies de gestion dédiées à leur conservation, voire à leur restauration.

Les altérations physiques d'origine naturelle et anthropique dans les biotopes littoraux lacustres

- 25 Pour arriver à prédire la distribution potentielle des plantes aquatiques, il est essentiel de définir leurs préférences hydroécologiques à une échelle et dans un contexte écologique donnés. À proximité des rives, dans les zones de faible profondeur, l'influence des vagues et de la pente des fonds est très importante et joue un rôle clé dans la composition spécifique et la distribution des macrophytes présents (Riis & Hawes, 2003). Dans le cas des lacs peu profonds du littoral aquitain, il est également intéressant de s'intéresser aux activités humaines en très forte progression durant ces dernières décennies à proximité et dans les lacs. Interface entre le milieu aquatique et le milieu terrestre, la zone littorale est celle où se concentrent les activités et usages anthropiques des lacs. Les effets de ces altérations anthropiques physiques du littoral lacustre sont souvent sous-estimés vis-à-vis d'autres sources de dégradation des lacs, telles que l'eutrophisation ou l'acidification (Whittier *et al.*, 2002). L'urbanisation de la zone riveraine des lacs, le renforcement des rives par des enrochements et des murs de soutien, la création d'aménagements tels que des pontons ou des haltes nautiques, les dégâts mécaniques occasionnés par le piétinement lors d'activités récréatives (baignade, équitation, pêche, etc.), à l'échouage et au mouillage des bateaux de plaisance sur la rive, etc., engendrent des modifications plus ou moins sévères de la morphologie et une artificialisation des rives des lacs, ainsi qu'une dégradation des biotopes aquatiques littoraux (Ballantyne & Pickering, 2013). Ces altérations anthropiques de l'hydromorphologie sont à l'origine d'une perte importante de biodiversité floristique et faunistique des rives des lacs (Strayer & Findlay, 2010).

Modèle de distribution des isoétides basé sur les variables physiques des biotopes aquatiques

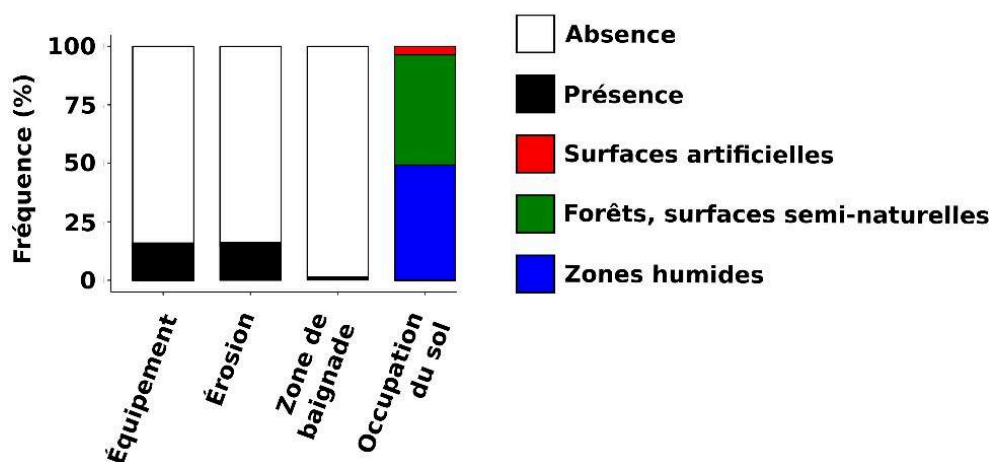
- 26 Ces analyses ont été réalisées pour les lacs médocains de Carcans-Hourtin et de Lacanau (Bertrin *et al.*, 2018). Les relevés floristiques disponibles sur les secteurs de rives ont été compilés dans un système d'information géographique à l'échelle des secteurs de rives (cf. 3.2.1). À ces données biologiques ont été associées des données environnementales telles que la description *in situ* de l'hydromorphologie⁷ (recensement des zones de baignade et des altérations anthropiques visibles des rives), l'estimation par modélisation de la morphodynamique locale (pente des fonds⁸, exposition aux vents et aux vagues⁹) et l'occupation du sol¹⁰ sur les rives. Une classification hiérarchique associée à une analyse des espèces-indicatrices ont été réalisées sur les données floristiques afin de déterminer les communautés fonctionnelles qui structurent les peuplements de plantes aquatiques présentes. Ces groupes de plantes ont été ensuite

confrontés aux données environnementales à l'aide d'une classification supervisée fondée sur des forêts d'arbres décisionnels (Random Forest). Ainsi, l'importance relative de chaque variable physique dans l'occurrence et la distribution des différentes communautés a été déterminée. Enfin, les paramètres du modèle ont été utilisés pour produire des cartes de prédiction de la distribution potentielle des différentes communautés dans les secteurs de rives.

Impacts des altérations physiques de l'hydromorphologie sur les isoétides

- 27 L'action des vagues semble jouer un rôle prédominant dans l'occurrence et la distribution des isoétides dans les lacs peu profonds. Les adaptations morphologiques de ces plantes, aux rosettes de feuilles courtes et rigides, et aux racines profondes, leur permettent de coloniser et de se maintenir dans les secteurs des lacs où l'hydrodynamique est intense. Les courants orbitaux¹¹ générés par les vagues, dirigés vers le fond, sont capables de remettre en suspension la matière organique nouvellement déposée sur les sédiments et de limiter l'accumulation de débris organiques dans les zones de faible profondeur. Cette forte hydrodynamique maintient également une concentration élevée en oxygène des eaux, condition nécessaire à l'activité bactérienne de dégradation de la matière organique.
- 28 La répartition spatiale des plantes aquatiques à l'échelle des lacs est également déterminée par l'occupation du sol sur les rives. *Lobelia dortmanna* semble privilégier les secteurs dont l'occupation du sol sur les rives est composée de zones humides (49 % des secteurs de rives colonisés par cette espèce dans les lacs médocains, voir figure 8) ou de surfaces semi-naturelles telles que les zones forestières (47 % des secteurs de rives colonisés). Seuls 4 % des secteurs où cette espèce est présente sont occupés par des zones artificialisées. De même, des altérations anthropiques physiques ponctuelles de l'hydromorphologie, telles que la présence de zones de baignade, des aménagements des rives et des zones d'érosion, sont des conditions défavorables à la présence de cette communauté de plantes : moins de 15 % des secteurs de rives où cette espèce est présente montrent ce type d'altération et seulement 2 % de ces secteurs sont proches d'une zone de baignade.
- 29 Ce modèle a permis la production de cartes de distribution potentielle des isoétides dans les lacs médocains. Ainsi, plusieurs dizaines de nouveaux secteurs présentant des conditions environnementales favorables au développement de ces espèces ont été identifiés. Parmi eux, de nombreux secteurs sont néanmoins impactés par la présence de zones de baignade, sites très souvent caractérisés par des conditions topographiques (pente des fonds) et hydrodynamiques compatibles à l'installation de ces plantes patrimoniales. L'acquisition de données biologiques et environnementales supplémentaires sur un plus grand nombre de lacs, notamment dans les lacs landais, permettraient d'améliorer significativement les résultats d'application de ce modèle. Ces cartes sont une proposition de support opérationnel aux gestionnaires dans la détermination à grain spatial relativement fin des sites favorables, en préalable à une politique de conservation, voire de restauration, des isoétides.

Figure 8 : Fréquences de différents types d'altérations de l'hydromorphologie des rives et d'occupation du sol dans la zone rivulaire des lacs de Carcans-Hourtin et de Lacanau dans les secteurs de rives colonisés par *Lobelia dortmanna* (abondance relative ≥ 1) (modifiée de Bertrin et al., 2018)



Conclusion

- 30 La présence dans les lacs et étangs aquitains de végétaux aquatiques rares tels que la Lobélie de Dortmann, espèce habituellement localisée dans les régions boréo-atlantiques du nord de l'Europe, révèle des conditions écologiques très particulières dans ces plans d'eau. Ces espèces qui composent la communauté d'isoétides, peuvent jouer un rôle important dans le fonctionnement écologique de certains biotopes de ces lacs en tant qu'espèces-ingénieurs. Elles peuvent également servir d'indicateurs performants de la qualité écologique de ces milieux, pouvant ainsi contribuer à une meilleure évaluation de leurs changements d'états et des conséquences de la gestion adaptative en cours de mise en place.
- 31 Toutefois, les changements globaux¹² (changement climatique, artificialisation des rives, introductions d'espèces exotiques envahissantes, intensification des usages récréatifs ...) participent grandement au déclin des isoétides dans ces lacs et étangs. Durant la dernière décennie, certains usagers (pêcheurs et chasseurs par exemple) et les gestionnaires locaux ont significativement amélioré la prise en compte de ces espèces dans le cadre des enjeux écologiques et de biodiversité de ces lacs et étangs. Il est désormais devenu urgent d'établir et d'appliquer une stratégie de conservation de ces espèces, passant entre autres par la préservation des niveaux trophiques actuels relativement faibles, et à les protéger des destructions mécaniques directes dans les zones littorales. La priorité devrait être donnée à la protection des sites qui abritent actuellement ces plantes aquatiques, ainsi qu'à la mise en place d'une réglementation adaptée, limitant en particulier les aménagements et régulant l'accès à certaines parties des rives des lacs aux usagers. La réussite d'une stratégie globale de conservation des isoétides sera conditionnée par la multiplicité et la diversité des sites bénéficiant de ce type de gestion. Cette réussite nécessitera également la poursuite des suivis écologiques tels que ceux mis en œuvre depuis 40 ans, et la mise en place de recherches complémentaires et d'expérimentations visant au rétablissement de populations plus importantes d'isoétides.

BIBLIOGRAPHIE

- Alleaume, S., Lanoiselée, C., Argillier, C. (2012). AlBer : Protocole de caractérisation des Altérations des Berges (version 2012.2). Irstea, p. 31.
- Arts, G.H.P. (2002). Deterioration of atlantic soft water macrophyte communities by acidification, eutrophication and alkalisation. *Aquatic Botany* 73.4, 373-393. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(02\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(02)00031-1)
- Baastrup-Spohr, L., Møller, C.L., Sand-Jensen, K. (2016). Water-level fluctuations affect sediment properties, carbon flux and growth of the isoetid *Littorella uniflora* in oligotrophic lakes. *Freshwater Biology* 61.3, 301-315. <https://doi.org/10.1111/fwb.12704>
- Ballantyne, M., Pickering, C.M. (2013). Tourism and recreation: a common threat to IUCN red-listed vascular plants in Europe. *Biodiversity and Conservation* 22.13, 3027-3044. <https://doi.org/10.1007/s10531-013-0569-2>
- Benelli, S., Bartoli, M., Ribaldo, C., Fano, E.A. (2019). Contrasting effects of an alien worm on benthic N cycling in muddy and sandy sediments. *Water*, 11. <https://doi.org/10.3390/w11030465>
- Bertrin, V., Lanoiselée, C., Barbe, J., Bonnard, R., Philippe, M., Dutartre, A., Argillier, C., Guibert, A., Irz, P. (2007). Application de l'outil SEQ plans d'eau sur différents types de lacs situés dans la circonscription du district Adour-Garonne : Etang de Soustons (40), Lac de Cazaux-Sanguinet (33 / 40), Retenues de Miélan (32), Laouzas (81), Filleit (09). Cemagref, p. 319.
- Bertrin, V., Dutartre, A., Caro, A., Boutry, S., Moreira, S., Jan, G. (2012). Communautés végétales aquatiques des lacs médocains. Cemagref, p. 134.
- Bertrin, V., Boutry, S., Alard, D., Haury, J., Jan, G., Moreira, S., Ribaldo, C. (2018). Prediction of macrophyte distribution: The role of natural versus anthropogenic physical disturbances. *Applied Vegetation Science* 21, 395-410 <https://doi.org/10.1111/avsc.12378>
- Bertrin, V. (2018). Écologie et déterminisme physique des peuplements de macrophytes dans les lacs naturels peu profonds. Application aux grands lacs du littoral aquitain de Carcans-Hourtin, Lacanau, Cazaux-Sanguinet et Parentis-Biscarrosse (Gironde, Landes). École doctorale sciences et environnements, ED 304, spécialité écologie évolutive, fonctionnelle et des communautés.
- Bolpagni, R., Pierobon, E., Longhi, D., Nizzoli, D., Bartoli, M., Tomaselli, M., Viaroli P. (2007). Diurnal exchanges of CO₂ and CH₄ across the water-atmosphere interface in a water chestnut meadow (*Trapa natans* L.). *Aquatic Botany* 87, 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.02.002>
- Capdevielle, P. (1979). Recherches écologiques et systématiques sur le phytoplancton du lac de Cazaux, Sanguinet, Biscarrosse. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I.
- Carpenter, S.R., Lodge, D.M. (1986). Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes. *Aquatic botany*, 26, 341-370.
- Carrel, G., Dutartre, A., Roger, M.C. (2010). Utilisation de données hydrobiologiques anciennes dans le contexte actuel de la biodiversité, conséquences et limites de l'exercice. *Sciences Eaux & Territoires* 3, 92-101. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(86\)90031-8](https://doi.org/10.1016/0304-3770(86)90031-8)
- Cellamare, M. (2009). Évaluation de l'état écologique des plans d'eau Aquitains à partir des communautés de producteurs primaires. Thèse de doctorat, Cemagref.

- Chauvin, C., Bertrin, V., Boutry, S., Feret, T., Lorient, S., Dutartre, A. (2014). Des méthodes basées sur les peuplements de macrophytes pour évaluer l'état écologique des milieux aquatiques. *Sciences Eaux et Territoires*, 54-59. <https://doi.org/10.3917/set.015.0054>
- Clément, B., Aidoud, A. (2009). Resistance against eutrophication based on 40-year diachronic study (1966-2006) on marginal wetlands of oligotrophic shallow lakes in south-west of France. *Euro-limpacs*, p. 27.
- Dierssen, K. (1981). Littorelletea communities and problems of their conservation in western Germany. *Coll. Phytosoc* 10.1981, 321-332.
- Dutartre, A., Delarche, A., Dulong, J. (1989). Plan de gestion de la végétation aquatique des lacs et des étangs landais. Cemagref, p. 124.
- Dutartre, A., Leveau, D., Moreau, A. (1997). Suivi du développement des plantes aquatiques exotiques : propositions d'interventions - Lac de Cazaux-Sanguinet et de Parentis-Biscarrosse : campagne 1997. Cemagref, p. 80.
- Dutartre, A. (2007). Plantes rares et protégées des plans d'eau aquitains. *Adour Garonne* 98, p. 12-14.
- Dutartre, A., Menozzi, M. (2008). De la gestion des plantes aquatiques envahissantes : intervenir pour quoi, pour qui, avec quelles modalités ? Ou comment agir malgré la variabilité des situations et des enjeux : application à la gestion des jussies. Edisud.
- EEA (2012). CORINE land cover project. Commission of the European Communities.
- ESRI (2011). ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Guisan, A., Reid, T., Baumgartner, J., Naujokaitis-Lewis, I., Sutcliffe, P., Tulloch, A., Regan, T., Tracey, R., Brotons, L., McDonald Madden, E., Mantyka-Pringle, C., Martin, T., Rhodes, J., Maggini, R., Setterfield, S., Elith, J., Schwartz, M., Wintle, B., Broennimann, O., ... Buckley, Y. (2013). Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters* 16.12, 1424-1435. <https://doi.org/10.1111/ele.12189>
- Havens, K. E., Kang-Ren, J., Rodusky, A.J., Sharfstein, B., Brady, M.A., East, T.L., Iricanin, N., Thomas James, R., Harwell, M.C., Steinman, A.D.. (2001). Hurricane effects on a shallow lake ecosystem and its response to a controlled manipulation of water level. *The Scientific World Journal* 1, 44-70. <https://doi.org/10.1100/tsw.2001.14>
- Hutchinson, G.E. (1975). A treatise on limnology. Volume III. Limnological botany. Wiley.
- Jeppesen, E., Sondergaard, M., Sondergaard, M., Christofferson, K. (2012). The structuring role of submerged macrophytes in lakes. T. 131. Springer Science & Business Media.
- Jones, C.G., Lawton, J.H., Shachak, M. (1997). Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. *Ecology* 78.7, 1946-1957. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[1946:PANEOO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[1946:PANEOO]2.0.CO;2)
- Keddy, P.A. (1982). Quantifying within-lake gradients of wave energy : Interrelationships of wave energy, substrate particle size and shoreline plants in axe lake, Ontario. *Aquatic Botany* 14, 41-58. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(82\)90085-7](https://doi.org/10.1016/0304-3770(82)90085-7)
- Laplace-Treytore, C., Prévost, E. (2014). Rapport d'activité du suivi scientifique des plans d'eau de Carcans-Hourtin, Lacanau, Cazaux-Sanguinet et Parentis-Biscarrosse : année 2013. Irstea EABX, p. 108.

- Laplace-Treytoure, C., Moreira, S. (2016). Rapport d'activité du suivi scientifique des plans d'eau de Carcans-Hourtin, Lacanau, Cazaux-Sanguinet et Parentis-Biscarrosse : année 2014. Irstea EABX, p. 113.
- Møller, C.L., Sand-Jensen, K. (2008). Iron plaques improve the oxygen supply to root meristems of the freshwater plant, *Lobelia dortmanna*. *New Phytologist*, 179(3), 848-856. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02506.x>
- Moreira, S., Laplace-Treytoure, C., Eon, M., Jan, G. (2015). Rapport d'activité du suivi scientifique des plans d'eau de Carcans-Hourtin, Lacanau, Cazaux-Sanguinet et Parentis-Biscarrosse : année 2015. Irstea EABX, p. 106.
- Moss, B., Stephen, D., Alvarez, C., Becares, E., Van De Bund, W., Collings, S.E., Van Donk, E., De Eyto, E., Feldmann, T., Fernández-Aláez, C., Fernández-Aláez, M., Franken, R.J.M., García-Criado, E., Gross, E.M., Gyllström, M., Hansson, L.A., Irvine, K., Järvalt, A., Jensen, J.P.,...Wilson, D. (2003). The determination of ecological status in shallow lakes – a tested system (ECOFAME) for implementation of the European Water Framework Directive. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 13.6, 507-549. <https://doi.org/10.1002/aqc.592>
- Murphy, K. (2002). Plant communities and plant diversity in softwater lakes of northern Europe. *Aquatic Botany* 73.4, 287-324. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(02\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(02)00028-1)
- Oguz, E., Elginöz, N., Koroglu, A., Sedat Kabdasli, M. (2013). The effect of reed beds on wave attenuation and suspended sediment concentration. *Journal of Coastal Research* 65, 356-361. <https://doi.org/10.2112/SI65-061.1>
- Ribaudo, C., Bartoli, M., Racchetti, E., Longhi, D., Viaroli, P. (2011). Seasonal fluxes of O₂, DIC and CH₄ in sediments with *Vallisneria spiralis*: indications for radial oxygen loss. *Aquatic Botany* 94, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2011.01.003>
- Ribaudo, C., Bartoli, M., Longhi, D., Castaldi, S., Neubauer, S.C., Viaroli, P. (2012). CO₂ and CH₄ fluxes across a *Nuphar lutea* (L.) Sm. stand. *Journal of Limnology* 71, 200-210. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2011.01.003>
- Ribaudo, C., Bertrin, V., Dutartre, A. (2014). Dissolved gas and nutrient dynamics within an *Egeria densa* Planch. bed. *Acta Botanica Gallica* 161.3, 233-241. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/12538078.2014.932703>
- Ribaudo, C., Jan, G., Bertrin, V. (2015). Interactions entre macrophytes et qualité de l'eau : le cas des isoétides et des exotiques dans les lacs aquitains. Irstea EABX, p. 40.
- Ribaudo, C., Jan, G., Bertrin, V. (2016). Distribution spatiale des herbiers d'hydrophytes exotiques dans les grands lacs aquitains. Irstea EABX, p. 35.
- Ribaudo, C., Bertrin, V., Jan, G., Anschutz, P., Abril, G. (2017). Benthic production, respiration and methane oxidation in *Lobelia dortmanna* lawns. *Hydrobiologia* 784.1, 21-34. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2848-x>
- Riis, T., Hawes, I. (2002). Relationships between water level fluctuations and vegetation diversity in shallow water of New Zealand lakes. *Aquatic Botany* 74.2, 133-148. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(02\)00074-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(02)00074-8)
- Roelofs, J.G.M., Schuurkes, J.A.A.R., Smits, A.J.M. (1984). Impact of acidification and eutrophication on macrophyte communities in soft waters. II. Experimental studies. *Aquatic Botany* 18, 389-411. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(84\)90059-7](https://doi.org/10.1016/0304-3770(84)90059-7)

Sand-Jensen K., Borum J., Binzer T. (2005). Oxygen stress and reduced growth of *Lobelia dortmanna* in sandy lake sediments subject to organic enrichment. *Freshwater Biology* 50, 1034–1048. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01382.x>

Scheffer, M. (2004). *Ecology of shallow lakes*. Kluwer Academic Publishers.

Smolders, A.J.P., Lucassen, E.C.H.E.T., Roelofs, J. (2002). The isoetid environment: biogeochemistry and threats. *Aquatic Botany* 73.4, 325-350. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(02\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(02)00029-3)

Strayer, D.L., Findlay, S.E.G. (2010). Ecology of freshwater shore zones. *Aquatic Sciences* 72.2, 127-163. <https://doi.org/10.1007/s00027-010-0128-9>

Takamura, N., Kadono, Y., Fukushima, M., Nakagawa, M., Kim, B.H.O. (2003). Effects of aquatic macrophytes on water quality and phytoplankton communities in shallow lakes. *Ecological Research* 18.4, 381-395. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2003.00563.x>

Whittier, T.R., Paulsen, S.G., Larsen, D.P., Peterson, S.A., Herlihy, A.T., Kaufmann, P.R. (2002). Indicators of Ecological Stress and Their Extent in the Population of Northeastern Lakes: A Regional-Scale Assessment. *BioScience* 52.3, 235-247. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0235:IOESAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0235:IOESAT]2.0.CO;2)

Yoshida, N., Iguchi, H., Yurimoto, H., Murakami A., Sakai, Y. (2014). Aquatic plant surface as a niche for methanotrophs. *Frontiers in Microbiology* 5, 30. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00030>

Yvon-Durocher, G., Montoya, J.M., Woodward, G., Jones, J.J., Trimmer, M. (2011). Warming increases the proportion of primary production emitted as methane from freshwater mesocosms. *Global Change Biology* 17, 1225–1234. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02289.x>

NOTES

1. Végétaux aquatiques visibles à l'œil nu, comprenant des groupements d'algues coloniales et filamenteuses, des macro-algues characées, des mousses, des fougères et des plantes à fleurs (phanérogames angiospermes)
2. Espèce ou un groupe d'espèces végétales ou animales dont les caractéristiques observées fournissent une indication sur le niveau de dégradation du milieu
3. Transformés, usés sous l'action du vent
4. Autorisation de récolte, utilisation, transport, cession de spécimens d'espèces végétales protégées obtenue auprès de la DREAL Aquitaine
5. Cadre d'une superficie de 1m².
6. Un quadrat est divisé en 16 cellules de quadrats, soit 625 cm² chacune.
7. Protocole AlBer (Alleaume *et al.*, 2012).
8. Outil *Surface and Slope* (ESRI, 2011).
9. Indice d'exposition aux vagues (Keddy, 1982) et *Wind Fetch Model* et *Wave Model* (ESRI, 2011).
10. CORINE Land Cover (EEA, 2012).
11. Mouvements d'eau décrivant une trajectoire circulaire dont le rayon diminue avec la profondeur.
12. Tous les changements imposés aux écosystèmes par l'anthropisation

RÉSUMÉS

Les lacs et étangs du littoral aquitain ont l'originalité d'abriter des plantes aquatiques protégées, rares et menacées, habituellement observées dans les régions boréo-atlantiques du nord de l'Europe. Ces plantes de petite taille, qui appartiennent à la communauté végétale des isoétides, composent des pelouses littorales rases souvent invisibles aux yeux des usagers des lacs. Ces plantes font l'objet de recherches scientifiques afin de déterminer leur rôle fonctionnel et leurs dynamiques écologiques dans les lacs peu profonds. L'acquisition de connaissances sur ces espèces a pour objectif d'aider à la gestion de l'ensemble des peuplements végétaux aquatiques dans les lacs et étangs aquitains. Les isoétides sont capables de transférer l'oxygène produit dans le sédiment lacustre et de contrôler les émissions de méthane. Les processus écologiques en cours depuis les quarante dernières années indiquent un déclin régulier des isoétides dans les lacs landais. L'action des vagues et l'exposition aux vents, l'occupation du sol sur les rives et les altérations physiques ponctuelles de l'hydromorphologie sont les paramètres physiques essentiels des biotopes aquatiques qui déterminent la répartition spatiale des isoétides dans les plans d'eau. Il est désormais urgent d'établir et d'appliquer une stratégie de conservation, voire de restauration, des isoétides, visant à préserver les niveaux trophiques actuels relativement faibles, et à les protéger des destructions mécaniques directes dans les zones littorales. Les résultats présentés dans cet article sont extraits et adaptés de travaux réalisés par INRAE (ex-Irstea) dans le cadre d'un post-doctorat et d'un doctorat financés par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.

Natural lakes and ponds located along the western French Atlantic coast shelter rare and endangered aquatic plants usually found in the North-Atlantic Boreal regions in Europe. These small plants, belonging to the isoetid plant community, constitute shoreline lawns hardly visible to lake users. Here we aim to determine the functional role and ecological dynamics of isoetids in these shallow lakes. Isoetids transfer radial oxygen in sediment and control methane emissions. Aquatic plant community dynamics indicate a decline in the occurrence and the abundance of isoetids over the last forty years. We highlight the role of wave action and wind exposure, land cover and anthropogenic physical disturbances of the shoreline in determining the spatial distribution of isoetids. Now, it is urgent to establish and implement a conservation strategy dedicated to isoetids, in order to preserve the current oligotrophic water quality of lakes and protect these species from direct mechanical destruction in lake littoral zones.

INDEX

Keywords : Macrophyte, softwater lake, lakeshore zone, ecosystem engineer, biogeochemistry, hydrodynamics, hydromorphology, spatio-temporal process, distribution model, *Lobelia dortmanna*, *Littorella uniflora*, *Isoetes boryana*

Mots-clés : Macrophyte, espèce-ingénieur, biogéochimie, hydrodynamique, morphologie, processus spatio-temporel, modèle de distribution, *Lobelia dortmanna*, *Littorella uniflora*, *Isoetes boryana*

AUTEURS

VINCENT BERTRIN

INRAE, UR EABX, F-33612 Cestas, France

SÉBASTIEN BOUTRY

INRAE, UR EABX, F-33612 Cestas, France

ALAIN DUTARTRE

21, avenue du Médoc, F-33114 Le Barp, France

GWILHERM JAN

INRAE, UR EABX, F-33612 Cestas, France

SYLVIA MOREIRA

INRAE, UR EABX, F-33612 Cestas, France

CRISTINA RIBAUDO

EA 4592 Géoressources & Environnement, F-33600 Pessac, France