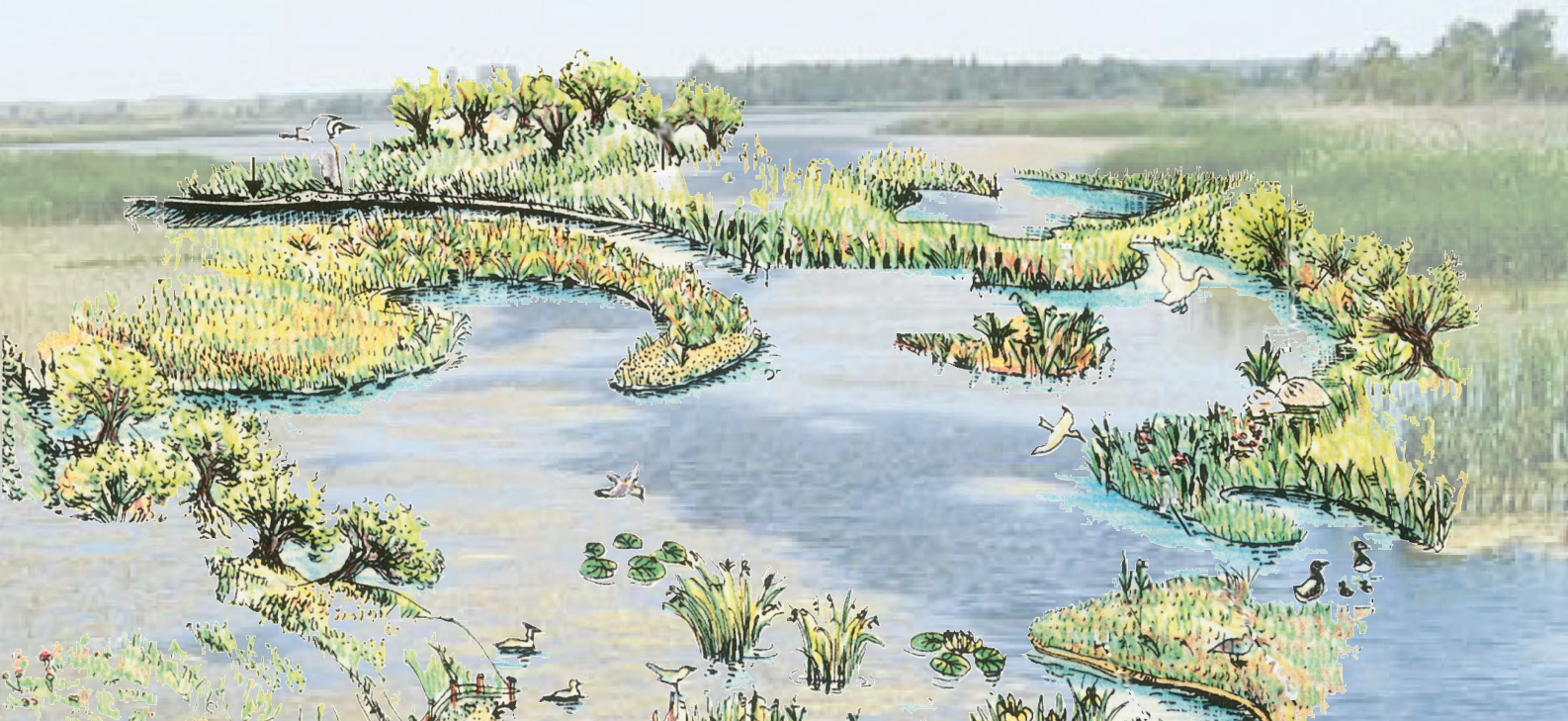
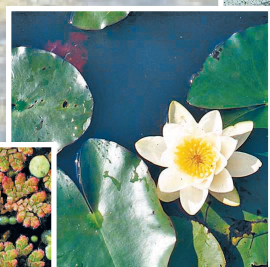


ingénieries

eau agriculture territoires



Plantes aquatiques d'eau douce : biologie, écologie et gestion



La revue Ingénieries Eau-Agriculture-Territoires s'adresse aux ingénieurs, techniciens et formateurs intervenant dans les domaines de l'environnement et de l'aménagement, sur les espaces ruraux et péri-urbains. Elle leur apporte des informations et des synthèses sur les équipements, méthodes et outils, déclinés par grandes spécialités parmi lesquelles l'agriculture, le développement local, la forêt, les risques, la qualité et la gestion des eaux, les déchets ou l'écologie terrestre.

Écrite par des spécialistes, elle représente un lien entre la recherche et l'action et met les résultats les plus récents de la recherche à la disposition des utilisateurs.

ABONNEMENT INGÉNIERIES-EAT

France : 62,50 euros TTC

Étranger : 74,70 euros

Pour vous abonner à Ingénieries-EAT, adressez votre règlement par chèque bancaire à l'ordre de : Lavoisier - Abonnements, 14 rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex, France.

Les abonnements sont annuels et partent d'un début de trimestre.

La rédaction d'Ingénieries-EAT ne peut être tenue responsable des opinions et commentaires émis par les auteurs.

Conseils aux auteurs : se reporter à la note aux auteurs présentée à la fin de chaque numéro.

Rédacteurs en chef : Jean-Louis Verrel (Inspection générale de l'Environnement) et Camille Cédra (Cemagref).

Comité de rédaction : Jacques Bories (Agence de l'eau Seine-Normandie), Patrick Demangeot (CGAAER), Philippe Jannot (Direction de l'eau), Myriam Legay (INRA), Christian Vanier (DRAF de Bourgogne), André Le Bozec, Jean-François Billot, Jean-Joël Gril, Éric Maille, Michel Penel, Laurent Peyras, Gwenaël Philippe et Christian Rigaud (Cemagref).

Directeur de la publication : Nicolas de Menthière.

Édition administration : Cemagref-DSIC, BP 44, 92163 Antony Cedex – ☎ 01 40 96 61 21 – 13^e année – quatre numéros et deux numéros spéciaux par an – Abonnement annuel France : 62,50 € ttc, étranger : 74,70 € – Prix du numéro normal : 15,24 € ttc – Numéro spécial : 22,87 € ttc – N° ISSN : 1264-9147 – Numéro paritaire : 0511 B 07860. Dépôt légal : à parution.

Secrétariat de rédaction/suivi d'édition : Valérie Pagneux (Cemagref) – Infographie photos : Françoise Peyriguer (Cemagref) – Infographie dessins, mise en page et impression : Jouve (Paris).

Photos de couverture : Marie-Christine Peltre et Serge Muller (LIEBE-UPV.M-CNRS), Jacques Haury (INRA-Agrocampus Rennes) et Nicolas Pipet (IIBSN).

Dessin de couverture : Marie-Laure Moyne (Cemagref).

Abonnements : Lavoisier Abonnement, 14 rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex – France ☎ 01 47 40 67 82).

ingénieries

eau – agriculture – territoires

Ce numéro spécial présente un état des connaissances en France sur la biologie et l'écologie des macrophytes aquatiques (lichens, macro-algues, bryophytes, ptéridophytes, phanérogames), les outils taxonomiques actuels, le cadre phytosociologique général permettant l'identification des phytocénoses, les spécificités écophysologiques de ces plantes, les réponses des communautés aux conditions environnementales et à leurs perturbations, leurs rôles dans l'habitat physique et leurs relations avec la faune aquatique. La bio-indication de l'état des cours d'eau utilisant les communautés de macrophytes est également détaillée, à la fois en termes d'indices de trophie des eaux, mais aussi comme perspective d'indication d'état écologique. La problématique des espèces proliférantes, indigènes ou exotiques, est traitée sous l'angle de la biologie et de l'écologie de ces espèces. Les modalités de gestion des macrophytes, en termes de conservation des espèces rares et de régulation des espèces proliférantes sont enfin présentées.

Sommaire

Introduction <i>Jacques Hauray, Alain Dutartre et Marie-Christine Peltre</i> _____	3
Le groupement d'intérêt scientifique « Macrophytes des eaux continentales » <i>Jacques Hauray, Alain Dutartre et Marie-Christine Peltre</i> _____	7
De la connaissance des macro-algues : une première approche A first approach of macroalgae <i>Élisabeth Lambert-Servien, Arlette Cazaubon, Marie-Christine Peltre et Christophe Laplace-Treytore</i> _____	9
Les lichens, bryophytes, ptéridophytes et phanérogames aquatiques Aquatic Lichens, Bryophytes, Pteridophytes and Phanerogams <i>Jacques Hauray, Gabrielle Thiébaud, Julie Coudreuse et Serge Muller</i> _____	23
Les communautés de macrophytes : typologie, dynamique et production The communities of macrophytes : typology, dynamic, production <i>Jacques Hauray et Serge Muller</i> _____	37
Biologie et écophysologie des macrophytes Biology and ecophysiology of macrophytes <i>Michèle Trémolières, Marie-Hélène Barrat-Segretain et Gabrielle Thiébaud</i> _____	51
Réponse des communautés végétales aux conditions environnementales : perturbations ou contraintes Response of plant communities to environmental conditions : disturbances or constraints <i>Michèle Trémolières, Isabelle Combroux, Gabrielle Thiébaud et Jacques Hauray</i> _____	63
Analyse multi-compartiments et rôles fonctionnels des macrophytes dans les hydrosystèmes Relationships with other abiotic and biotic ecosystem elements and functional roles of macrophytes <i>Jacques Hauray, Arlette Cazaubon, Marie-Hélène Barrat-Segretain, Arnaud Elger et Gabrielle Thiébaud</i> _____	79

Coordination scientifique :
Jacques Hauray
(Agrocampus-INRA),
Alain Dutartre (Cemagref)
et Marie-Christine Peltre
(Université de Metz)

Ingénieries
n° spécial

sommaire (suite)

La bio-indication et les indices macrophytiques, outils d'évaluation et de diagnostic de la qualité des cours d'eau	
The Bioindication and indices macrophytic, assessment tools and diagnostic quality of rivers	
<i>Christian Chauvin, Marie-Christine Peltre et Jacques Haury</i> _____	91
Biologie des macrophytes à potentiel proliférant	
Biology macrophytes a risk of proliferation	
<i>Marie-Christine Peltre, Alain Dutartre, Marie-Hélène Barrat-Segretain et Sophie Dandelot</i> _____	109
Conservation des macrophytes et habitats aquatiques rares et protégés sur le territoire français	
Conservation of Habitats and aquatic Macrophytes rare and protected in France	
<i>Serge Muller et Jacques Haury</i> _____	125
Régulation des développements de plantes aquatiques	
Aquatic plants control	
<i>Alain Dutartre, Marie-Christine Peltre, Nicolas Pipet, Lionel Fournier et Marie-Jo Menozzi</i> _____	135
Conclusion _____	155
Index des noms vernaculaires cités _____	157

Introduction

Faire une synthèse de l'état des connaissances sur les plantes aquatiques en France est une gageure. C'est pourtant l'objectif du réseau de spécialistes rassemblés au sein du groupement d'intérêt scientifique (GIS) *Macrophytes des eaux continentales*.

Les macrophytes sont, par définition (Symoens *et al.*, 1982¹), les végétaux visibles à l'œil nu, dont une bonne partie est identifiable sur le terrain : incluant les plantes supérieures, les bryophytes et les ptéridophytes, ils comprennent aussi, par extension, les algues filamenteuses, voire les colonies macroscopiques de cyanobactéries ou d'organismes hétérotrophes tels que certaines bactéries ou champignons filamenteux.

Ce numéro spécial présente les travaux de ce réseau et les publications d'autres équipes avec lesquelles des collaborations ont été établies et, plus généralement, des publications jugées utiles pour éclairer la présente thématique. Il s'agit d'une introduction à l'écologie (au sens large) des plantes aquatiques, reprenant les acquis récents du domaine, et présentant une synthèse actualisée, d'autant plus nécessaire que la directive cadre européenne sur l'eau et la directive « Habitats » imposent de prendre en considération ces végétaux comme éléments biologiques participant à la définition de l'état écologique des milieux aquatiques.

Où trouve-t-on ces macrophytes ? Une réponse lapidaire est : *dès qu'il y a présence d'eau avec une certaine permanence*. Il est alors tentant de confondre les « milieux à macrophytes » avec les zones humides telles que définies par la Convention de Ramsar de 1971, la loi sur l'eau de 1992², et le groupe des experts du Muséum (1996)... Ceci est d'autant plus fondé que ces zones humides sont souvent décrites par leur végétation adaptée à un engorgement des sols, à la présence d'une nappe d'eau à proximité de la surface, avec, pour les eaux superficielles, des profondeurs n'excédant pas six mètres, ce qui correspond approximativement à la zone euphotique des biologistes aquatiques (c'est-à-dire celle où la pénétration de la lumière est suffisante pour permettre la photosynthèse).

Sur la figure 1, les différents types de zones humides continentales et littorales (à l'exclusion des zones marines et notamment de l'estran) où l'on trouve des macrophytes sont représentés. Les principaux critères typologiques sont les suivants :

- présence ou absence de courant,
- hydrosystème ouvert (cours d'eau) ou fermé (plan d'eau),
- permanence de la masse d'eau : milieux permanents (lacs, étangs, grands cours d'eau), opposés aux milieux temporaires (têtes de bassin versant, mares temporaires, notamment en milieu méditerranéen, prairies inondables), en distinguant aussi les zones de marnage en bordure des cours d'eau et plans d'eau,
- eaux superficielles ou souterraines (niveau des nappes superficielles),
- qualité de l'eau, à la fois en termes de salinité et de trophie.

Durant des décennies, les zones humides, et plus spécialement les milieux aquatiques, ont été relativement délaissées par les botanistes : au-delà de la limite d'une intervention d'une personne chaussée de bottes, de très rares relevés étaient réalisés. À cette limite d'accessibilité, s'ajoutaient d'autres raisons qui n'encourageaient pas la prospection de ces milieux : l'absence de fleurs la plupart du temps, la prédominance de la multiplication végétative, diverses difficultés taxonomiques.

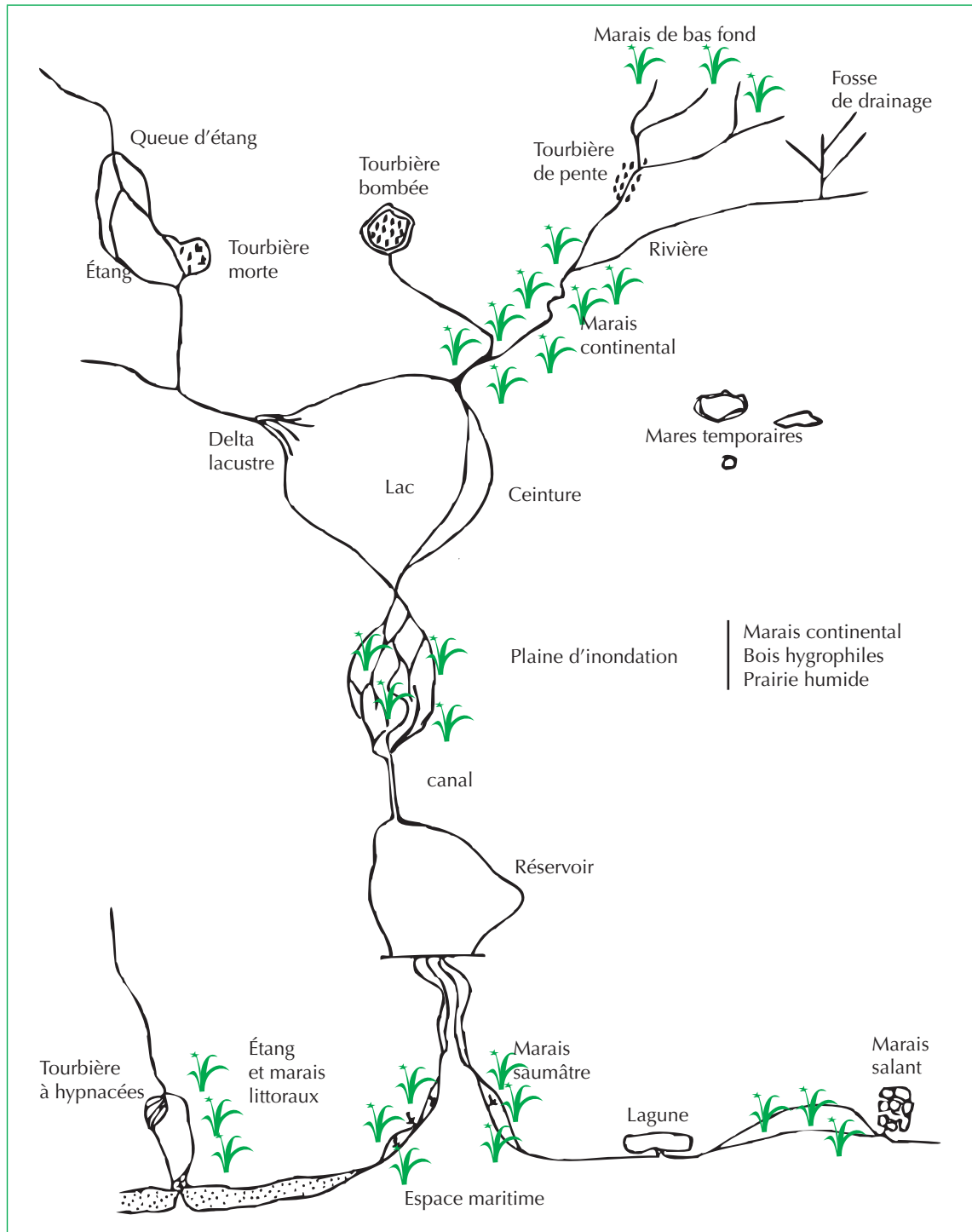
Finalement, contrairement à ce qui a pu se passer pour le phytoplancton, peu de scientifiques s'y sont intéressés. Même dans les flores, des inexactitudes importantes et gênantes (par exemple la non-distinction entre les renoncules aquatiques) ont persisté jusqu'au milieu du XX^e siècle. Historiquement, le compartiment des macrophytes a surtout été étudié en phytosociologie et essentiellement dans les eaux stagnantes, dans de nombreuses régions françaises, avec des publications restées assez régionales ou dans le cadre de thèses. Ces écrits mettaient généralement en évidence le déterminisme de la distribution des phytocénoses en fonction de la qualité de l'eau et des gradients du milieu physique (profondeur de l'eau, granulométrie et caractéristiques géochimiques et structurales des substrats). Ces résultats restaient toutefois relativement confinés au monde scientifique, avec peu de publications majeures. Néanmoins, l'intérêt des macrophytes pour caractériser les milieux qu'ils colonisent, mais aussi les difficultés de leur étude, ont été mis en exergue assez tôt.

Les inventaires sur les cours d'eau sont relativement récents, et les études concernant l'intégralité d'un réseau hydrographique datent seulement du début des années 1980. Initialement descriptives, les recherches sont

1. SYMOENS, J.-J., HOOPER, S.-S., COMPÈRE, P. (Eds.), 1982, *Studies on aquatic vascular plants*, Proc. Int. Coll. on Aquatic Vascular Plants, R. Bot. Soc. Belgium, Brussels, 424 p.

2. Article 2 de la loi sur l'eau de 1992 : « ... on entend par zone humide les terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année... ».

► Figure 1 – Milieux où l'on rencontre des macrophytes (modifié d'après HAURY, J., PICHON, B., 1977, *Contribution à l'étude des zones humides de Bretagne*, diplôme d'agronomie approfondie, École nationale supérieure agronomique de Rennes, Laboratoire Écologie végétale, Université de Rennes, 165 p.).



désormais de plus en plus orientées vers une vision fonctionnelle des hydrosystèmes et s'attachent à quantifier les rôles que les macrophytes y jouent.

Une autre approche, plus opérationnelle, a été développée autour des notions de proliférations végétales, au départ d'espèces indigènes puis exotiques envahissantes. Elle a justifié de nombreux travaux qui ont montré l'importance de connaissances sur la biologie et l'écologie des espèces, mais aussi de l'information sur la gestion des écosystèmes perturbés. L'information et la formation des acteurs sont rapidement apparues

comme des actions clés pour résoudre les problèmes concrets du terrain. La problématique des invasions biologiques est plus récente, et surtout plus généralisée, étant associée par certains scientifiques aux changements globaux et climatiques.

Désormais, notamment en raison des développements réglementaires, mais aussi de problèmes qui apparaissent croissants et d'une demande sociale pressante, les sollicitations des gestionnaires auprès des scientifiques sont importantes pour des outils de caractérisation des milieux et pour une aide à la gestion des dysfonctionnements (proliférations macrophytiques, mais aussi développements de cyanobactéries, etc.).

L'un des enjeux du fonctionnement du GIS Macrophytes est alors de répondre à ces demandes, tout en maintenant une recherche de bon niveau scientifique, avec les publications qui doivent normalement en résulter.

Ce numéro spécial présente donc un état actualisé des connaissances : la biologie et l'écologie des algues (Lambert-Servien *et al.*, *infra*), et des macrophytes évolués – bryophytes, lichens, ptéridophytes et spermatophytes – (Haury *et al.*, *infra*) sont présentées comme la base des études sur les macrophytes, avec les développements centrés sur les espèces ou populations, en soulignant les pistes de recherche en écologie populationnelle « traditionnelle ». Les problèmes et outils taxonomiques actuels sont présentés dans chacun de ces deux articles.

Les macrophytes forment des communautés (ensembles floristiques et groupements) dont le déterminisme est à la base de toutes les études biotypologiques et de bio-indication. La production macrophytique des communautés de cours d'eau est présentée avec les chiffres actuels. Le cadre général phytosociologique est désormais le plus approprié pour identifier ces phytocénoses (Haury et Muller, *infra*).

Les spécificités de l'écophysologie des macrophytes (Trémolières *et al.*, *infra*) sont un élément majeur focalisant actuellement de nombreuses recherches fondamentales, dont l'application est l'étude des réponses des communautés aux conditions environnementales et à leurs perturbations (Trémolières *et al.*, *infra*).

Les macrophytes ne sont pas un élément neutre dans les écosystèmes. Outre leur production présentée antérieurement, les macrophytes jouent des rôles physiques et chimiques qui permettent de les qualifier d'espèces « ingénieurs ». Ils interviennent donc comme support de l'épiphyton, source de nourriture et habitats des invertébrés et en termes de facteur de répartition des communautés pisciaires (Haury *et al.*, *infra*).

L'application majeure de la bio-indication de l'état des hydrosystèmes avec les macrophytes est détaillée, à la fois en termes d'indices de la trophie des eaux, mais aussi comme perspective d'indication de l'habitat physique, avec des outils et perspectives d'application à l'échelle européenne (Chauvin *et al.*, *infra*).

Concernant la gestion des populations et compte tenu de l'importance des proliférations végétales, il est nécessaire de décrypter le potentiel proliférant, lié bien sûr à la biologie des espèces, mais aussi aux milieux qu'ils envahissent (Peltre *et al.*, *infra*). En termes de gestion, la conservation des espèces et communautés d'intérêt patrimonial est déclinée en regard du contexte réglementaire, et les outils élaborés pour l'identification et les orientations de gestion présentés (Muller et Haury, *Infra*). Enfin la gestion-intervention pour la régulation des populations envahissantes, avec les différents aspects écologiques et sociétaux, est développée comme résultant du continuum recherche-développement-action (Dutartre *et al.*, *infra*).

Jacques Haury


UMR INRA-Agrocampus Rennes 985,
Écologie et santé des écosystèmes,
Laboratoire d'écologie et sciences phytosanitaires

Alain Dutartre

Cemagref,
UR Réseaux, épuration et qualité des eaux

Marie-Christine Peltre

Université Paul Verlaine de Metz,
Laboratoire des interactions écotoxicologie,
biodiversité, écosystèmes



**Macrophytes
des Eaux
Continental**

Groupement d'Intérêt Scientifique

Le groupement d'intérêt scientifique « Macrophytes des eaux continentales »

Le groupement d'intérêt scientifique (GIS) « *Macrophytes des eaux continentales* » a été créé en 1992 à l'instigation de quelques scientifiques qui voulaient formaliser leur réseau de compétences pour structurer la recherche et la réponse aux gestionnaires dans le domaine des plantes aquatiques. Il a succédé à un groupe de travail informel « Microphytes-Macrophytes » (1977-1984) puis à un groupe « Plantes aquatiques » du COLUMA (Comité de lutte contre les mauvaises herbes). Les activités de ce groupe ont continué de 1988 à 1993 au sein de l'Association nationale de protection des plantes (ANPP)¹.

Les activités du GIS en tant que réseau scientifique ont principalement porté sur les communautés végétales des cours d'eau :

- mise en place d'un protocole standardisé d'analyse de la végétation des cours d'eau (1990-1998),
- élaboration puis proposition d'indice de qualité biologique des cours d'eau – indices GIS (1993-1996),
- synthèse sur les méthodes de bio-indication puis normalisation de l'indice biologique macrophytique en rivière – IBMR (1999-2005) et développement de cet indice.

Par ailleurs, ce réseau national a permis de réaliser une synthèse sur les plantes proliférantes (1995-1997) – Muller *et al.*, 1997, de participer au programme national sur les invasions biologiques (INVABIO, 2003-2006) grâce à deux projets (Dutartre *et al.*, 2007 ; Thiébaud *et al.*, 2006) et d'organiser deux colloques internationaux sur les plantes aquatiques (Trémolières et Muller, 1995 ; Dutartre *et al.*, 2002 ; Caffrey *et al.*, 2006).

Il a également contribué à créer une dynamique de recherche sur les plantes aquatiques en France, en participant depuis sa création à la fédération des efforts dans ce domaine, et a facilité la participation de scientifiques à des groupes de travail sur la gestion des plantes aquatiques envahissantes, par exemple dans le bassin Loire-Bretagne² et la région des Pays de la Loire³.

Parmi les travaux publiés les plus significatifs du GIS, citons :

CAFFREY, J.-M., DUTARTRE, A., HAURY, J., MURPHY, K.-J., WADE, P.-M., (*guest editors*), 2006, *Macrophytes in Aquatic Ecosystems : from biology to management*, Hydrobiologia (EWRS 11th Symp. Aquatic Weeds), Moliets et Maâ (Landes) 3-7 sept. 2002, Development in Hydrobiology/Hydrobiologia, Springer, Hydrobiologia, 570, 263 p.

DUTARTRE, A., MONTEL, M.-H., (Eds), 2002, *Gestion des plantes aquatiques* (11th International Symposium on Aquatic Weeds – EWRS), Cemagref, Conseil général des Landes, INRA, ENSAR), 3-7 septembre 2002, Moliets et Maâ (40), Cemagref Bordeaux, 448 p.

DUTARTRE, A. (coord.), DANDELLOT, S., HAURY, J., LAMBERT, E., LE GOFFE, P., MENOZZI, M.-J., 2004, *Programme de recherche Invasions Biologiques. Les jussies : caractérisation des relations entre sites, populations et activités humaines. Implications pour la gestion*, rapport intermédiaire, Cemagref Bordeaux, 44 p.

DUTARTRE, A. (coord.), 2006, *Les jussies : caractérisation des relations entre sites, populations et activités humaines. Implications pour la gestion*, in : *Programme de recherche Invasions biologiques*, coll. restitution, 17-19 oct. 2006, Moliets (Landes), p. 91-96.

DUTARTRE, A. (coord.), DANDELLOT, S., HAURY, J., LAMBERT, E., LE GOFFE, P., MENOZZI, M.-J., 2007, *Programme de recherche Invasions Biologiques. Les jussies : caractérisation des relations entre sites, populations et activités humaines. Implications pour la gestion*, rapport final. Cemagref Bordeaux, 128 p.

HAURY, J., MULLER, S., 1998, *Groupement d'Intérêt Scientifique (G.I.S.) « Macrophytes des eaux continentales »*. *Bilan de la période 1993-1997*, Rennes et Metz, 39 p.

HAURY, J., PELTRE, M.-C., 1993, Intérêts et limites des « indices macrophytes » pour qualifier la mésologie et la physico-chimie des cours d'eau : exemples armoricains, picards et lorrains, *Ann. Limnol.*, vol. 29, n° 3-4, p. 239-253.

1. Dutartre, 1994, groupe « Plantes aquatiques », ANPP, rapport d'activité, 99 p.

2. http://www1.centre.ecologie.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=154

3. http://www.pays-de-loire.ecologie.gouv.fr/article.php3?id_article=331

- HAURY, J., PELTRE, M.-C., DUTARTRE, A., 2002, *Groupement d'Intérêt Scientifique (G.I.S.) « Macrophytes des eaux continentales », Bilan de la période 1998-2002*, Rennes et Metz, 50 p.
- HAURY, J., PELTRE, M.-C., MULLER, S., TREMOLIERES, M., BARBE, J., DUTARTRE, A., GUERLESQUIN, M., 1996, Des indices macrophytiques pour estimer la qualité des cours d'eau français : premières propositions, *Écologie*, vol. t. 27, n° 4, p. 233-244.
- HAURY, J., JAFFRE, M., DUTARTRE, A., PELTRE, M.-C., BARBE, J., TREMOLIERES, M., GUERLESQUIN, M., MULLER, S. 1998, Application de la méthode milieu et végétaux aquatiques fixés à douze rivières françaises : typologie floristique préliminaire, *Annales de limnologie*, vol. 34, n° 2, p. 129-138.
- HAURY, J., PELTRE, M.-C., MULLER, S., THIEBAUT, G., TREMOLIERES, M., DEMARS, B., BARBE, J., DUTARTRE, A., DANIEL, H., BERNEZ, I., GUERLESQUIN, M., LAMBERT, E., 2000, *Les macrophytes aquatiques bio-indicateurs des systèmes lotiques – Intérêts et limites des indices macrophytiques. Synthèse bibliographique des principales approches européennes pour le diagnostic biologique des cours d'eau*, Études sur l'Eau en France, n° 87, 101 p. + ann.
- MULLER, S., PELTRE, M.C., OLLIVIER, M., PETITDIDIER, D., THIEBAUT, G., DUTARTRE, A., MOREAU, A., MUTTERLEIN, C., BARBE, J., LAGRANGE, C., 1997, *Biologie et écologie des espèces végétales proliférant en France*, Les études de l'agence de l'eau n° 68, 199 p.
- PELTRE, M.-C., MULLER, S., OLLIVIER, M., DUTARTRE, A., BARBE, J., HAURY, J., TRÉMOLIÈRES, M., 2002, Les proliférations végétales en France. Caractères biologiques et écologiques des principales espèces et milieux propices. I. Bilan d'une synthèse bibliographique, *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, n° 365/366, p. 237-258.
- PELTRE, M.-C., DUTARTRE, A., BARBE, J., HAURY, J., MULLER, S., OLLIVIER, M., TRÉMOLIÈRES, M., 2002, Les proliférations végétales en France. Caractères biologiques et écologiques des principales espèces et milieux propices. II. Intérêt pour la gestion, *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, n° 365/366, p. 259-280.
- SYMOENS, J.-J., HOOPER, S.-S., COMPÈRE, P. (Eds.), 1982, *Studies on aquatic vascular plants*, Proc. Int. Coll. on Aquatic Vascular Plants, R. Bot. Soc. Belgium, Brussels, 424 p.
- THIEBAUT, G. (coord.), MULLER, S., TRÉMOLIÈRES, M., 2006, Étude comparative de deux espèces végétales aquatiques invasives en France : *Elodea nuttallii* et *E. canadensis*. Stratégies adaptatives, facteurs écologiques, polymorphisme génétique des espèces, contribution au contrôle du phénomène invasif, in : *Programme de recherche Invasions biologiques*, coll. restitution, 17-19 oct. 2006, Moliets (Landes), p. 135-142.
- THIEBAUT, G. (coord.), MULLER, S., TRÉMOLIÈRES, M., 2006, *Étude comparative de deux espèces végétales aquatiques invasives en France : Elodea nuttallii et E. canadensis. Stratégies adaptatives, facteurs écologiques, polymorphisme génétique des espèces, contribution au contrôle du phénomène invasif*, Programme de recherche Invasions biologiques, rapport final, 58 p.
- TRÉMOLIÈRES, M., MULLER, S. (Eds.), 1995, Macrophytes aquatiques et qualité de l'eau, Actes de la conférence européenne « Macrophytes et qualité de l'eau », Ottrott, France, 18-20 oct. 1994, *Acta Bot. Gallica*, vol. 142, n° 6, p. 489-749.

Jacques Hauray

Président du GIS

Alain Dutartre et Marie-Christine Peltre

Secrétaires

De la connaissance des macro-algues : une première approche

Élisabeth Lambert-Servien ^a, Arlette Cazaubon ^b, Marie-Christine Peltre ^c
et Christophe Laplace-Treytore ^d

Ce document présente un état des connaissances sur les macro-algues et constitue une première approche pour s'initier à leur taxonomie, biologie et écologie. Les néophytes trouveront quelques notions générales sur les algues, avec la présentation des principaux ouvrages de systématique et un volet traitant de leur phylogénie. Leurs différents habitats et le rôle des principaux facteurs environnementaux sont ensuite développés ainsi que les notions de bio-indication qui sont associées à ces macrophytes, et leur application directe à travers des indices de qualité des eaux actuellement en usage.

Les algues sont des organismes autotrophes, c'est-à-dire capables de synthétiser directement les matières organiques qui les composent à partir d'éléments minéraux et de l'énergie solaire. Cette synthèse est rendue possible par différents pigments, dont les chlorophylles : a, b, c ou e et divers autres dont les phycocyanines. Elles sont une partie des producteurs primaires constituant le premier niveau trophique des écosystèmes. Elles sont un élément fondamental du fonctionnement des milieux aquatiques et en particulier la ressource trophique des organismes phytophages, comme par exemple les herbivores râcleurs de substrats. Les algues croissent aussi bien en milieu marin qu'en eaux douces.

On recense actuellement environ 1 100 genres d'algues d'eaux douces répartis en 13 500 espèces sous tous les climats (Bourrelly, 1981, 1990 a- b). Elles sont présentes aussi bien en milieu lotique

(fleuves, rivières, torrents, canaux...) que lentique (étangs, lacs, réservoirs...). Outre la pleine eau pour certaines espèces, qui sont alors qualifiées de phytoplancton, elles peuvent aussi se développer sur différents substrats, le terme « algues benthiques » est alors utilisé. Dans ce cas, dès lors que ces algues deviennent repérables à l'œil nu et au moins partiellement identifiables, elles sont considérées comme des macro-algues. Elles sont de ce fait intégrées dans la définition que l'on donne actuellement des macrophytes (Haury et Peltre, 1993).

Différentes classifications peuvent être employées pour décrire les communautés algales, suivant que l'on se base sur des critères systématiques, morphologiques ou écologiques.

Systématique

Une grande partie des genres d'algues benthiques d'eau douce sont des algues vertes (chlorophycées). On rencontre également des algues brunes (xanthophycées), rouges (rhodophycées) ou encore des cyanobactéries (antérieurement dénommées « algues bleues »).

Les ouvrages français de systématique algale d'eau douce sont relativement peu nombreux. Ceux de Bourrelly (1981, 1990a, b) et celui de Germain (1981) font référence en la matière. Pierre (2001) a réalisé un catalogue de ses inventaires algologiques dans le Nord-Est de la France. Plusieurs guides illustrés facilitent les identifications : le

Les contacts

a. Centre d'étude et de recherche sur les écosystèmes aquatiques (CEREA), UCO/IBEA, BP 10808, 44 rue Rabelais, 49008 Angers Cedex 01

b. UMR (case C31), Laboratoire d'écologie des eaux continentales méditerranéennes, Faculté des sciences et techniques de Saint-Jérôme, 13397 Marseille Cedex 20

c. Université de Metz, UFR Sci-FA, Laboratoire des interactions écotoxicologie, biodiversité, écosystèmes, Campus Bridoux, avenue du Général Delestraint, 57070 Metz Cedex
d. Cemagref, UR Réseaux, épuration et qualité des eaux, 50 avenue de Verdun, 33612 Cestas Cedex

1. Association française de normalisation.
2. Indice biologique macrophytique en rivière.

guide de détermination des principaux genres d'algues macroscopiques (Rodriguez et Vergon, 1996), celui de Leitao et Couté (2005) qui permet de s'initier aux cyanobactéries planctoniques ainsi que le guide méthodologique sur les diatomées, indispensable pour la mise en œuvre de l'indice biologique diatomées ou IBD (Afnor¹, 2000). À cela s'ajoute un certain nombre d'ouvrages de langue anglaise plus récents tels que ceux de John *et al.* (2002) et Wehr et Sheath (2003) pour l'ensemble des groupes taxinomiques, Kumano (2002) pour les algues rouges du monde, mais aussi Komarek et Anagnostidis (1999 et 2005) pour les cyanobactéries, ou encore Kargupta (2004) pour les *Zygnemataceae*.

Des collections d'ouvrages plus anciens telles que « *Das Phytoplankton des Süßwasser. Systematik und biologie* » (éditeur : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart) peuvent s'avérer très utiles pour un certain nombre de déterminations. Pour les algues filamenteuses, les outils actuellement disponibles permettent des déterminations relativement aisées jusqu'au genre, mais sont beaucoup moins efficaces lorsqu'une détermination jusqu'au niveau de

l'espèce (détermination spécifique) est nécessaire. Ceci explique, par exemple, le choix actuel de détermination générique (jusqu'au genre) dans le cadre de l'application de l'indice IBMR² basé sur les communautés de macrophytes (Afnor, 2003), tandis que les indices diatomiques exigent l'identification de nombreuses espèces (Afnor, 2000).

En ce qui concerne les characées, l'ouvrage de Corillion (1975) sert souvent de référence. Il peut être complété par ceux de Moore (1986), Stewart *et al.* (1992) et il est aussi très intéressant de pouvoir se référer aux iconographies de Wood *et al.* (1964-1965), ainsi qu'aux travaux de Compère (1992) et Schubert *et al.* (2003).

Phylogénie

L'ensemble des plantes comportant des pigments chlorophylliens est issu des mêmes ancêtres. Au cours de l'évolution, deux phyllums se sont séparés dont l'un a donné les cyanobactéries, les algues brunes et les algues rouges, l'autre les algues vertes, dont les characées, et les plantes dites « supérieures ».

Diverses études ont porté sur la phylogénie des charophytes au sens large et leurs liens particuliers avec l'origine des plantes terrestres (Mc Court *et al.*, 2004). Parmi ces charophytes, l'ordre des charales ou charophytes au sens strict et la famille des *Characeae* ont été étudiés à partir des espèces actuelles et fossiles par Soulié-Marsche (1999) et Feist *et al.* (2005 a-b). Bonis *et al.* (1993), Simo Santalla *et al.* (1999) ainsi que Mc Court *et al.* (1996, 1999) ont travaillé à partir de la morphologie et de marqueurs génétiques (isoenzymatiques ou moléculaires) de diverses characées actuelles.

La famille des characées (charophycées) qui comprend six genres vivants, tous représentés en France, est souvent subdivisée en deux sous-familles : les *Chareae* (genres *Chara*, *Nitellopsis*, *Lamprothamnium*, *Lychnothamnus*) et les *Nitelleae* (genres *Nitella* et *Tolypella*). Les genres *Chara* (photo 1) et *Nitella* sont les plus riches en espèces ; vient ensuite le genre *Tolypella*. Les trois derniers genres (*Lamprothamnium*, *Lychnothamnus*, *Nitellopsis*) ne sont représentés chacun que par une espèce.

Taille et morphologie

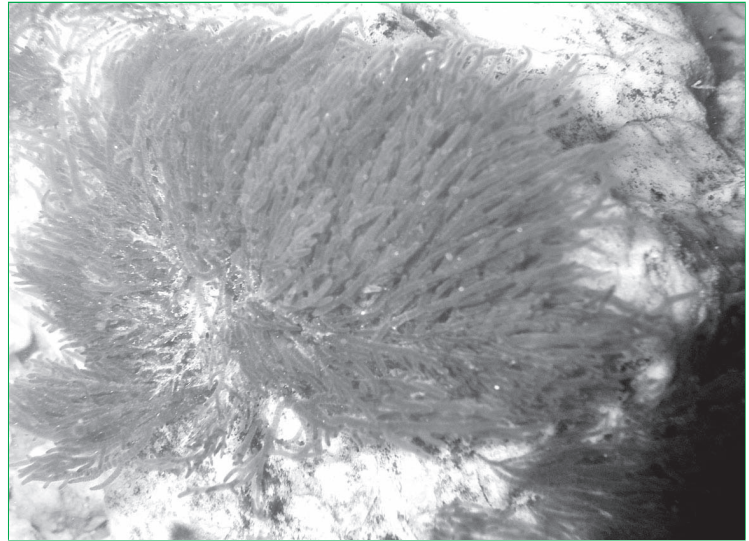
Ces deux critères sont tous deux très variables. Selon la taille des cellules et/ou des colonies (filaments ou thalles), on distingue les micro-algues

► Photo 1 – Characées (genre *Chara*) – photo : Élisabeth Lambert.



(< 300 µm) visibles uniquement au microscope, des macro-algues (> 300 µm) observables de visu. Dans cette seconde catégorie, on place les algues dont les cellules individuelles sont généralement de taille inférieure à 300 µm, mais qui sont associées en colonies de grande taille et que l'on considère de ce fait comme des macro-algues. C'est le cas de certaines algues filamenteuses simples, comme la diatomée *Melosira varians*, ou ramifiées, comme la chlorophyte *Cladophora* sp. ou la rhodophyte *Batrachospermum* sp. (photo 2), ainsi que de certaines cyanobactéries dont les trichomes (filaments) atteignent de grandes tailles, comme *Planktothrix agardhii* ou *Anabaena spiroïdes*. Certaines macro-algues peuvent former des coussins, comme *Vaucheria* sp., ou des masses plus ou moins structurées, comme les cellules organisées en réseaux d'*Hydrodictyon* sp., ou les masses informes des filaments de *Spirogyra* sp. (photo 3) ou de *Zygnema* sp.

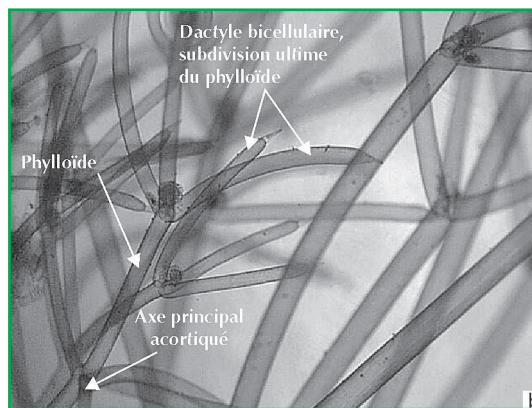
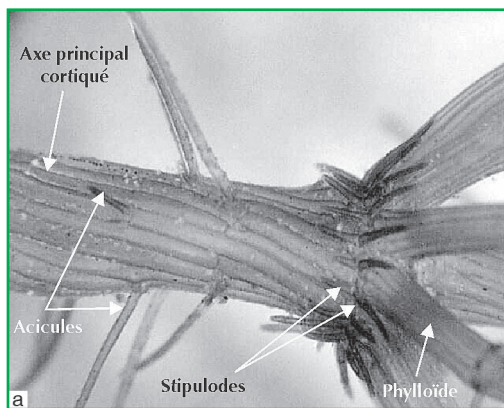
Les characées présentent un grand degré de différenciation et une morphologie variable (polymorphisme) pouvant être liés aux caractéristiques physiques et chimiques des biotopes. Selon les espèces, la taille de leur appareil végétatif peut varier entre quelques centimètres et environ 1 m. Il est caractérisé par un axe principal (photo 4) avec des nœuds et entre-nœuds plus ou moins longs présentant ou non une cortication (filaments recouvrant la paroi de l'entre-nœud) et des acicules (petit aiguillon) ; par exemple, le genre *Chara* est le plus souvent cortiqué, le genre *Nitella* est non cortiqué. Au niveau des nœuds, s'observent des verticilles de phylloïdes (rameaux courts) à la base desquels se développent plus ou moins de petits appendices appelés stipulodes. Dans le genre *Nitella*, la subdivision ultime des phylloïdes constitue le dactyle.



▲ Photo 2 – *Batrachospermum* sp. – photo : Christophe Laplace-Treuture.



▲ Photo 3 – *Spirogyra* sp. dans une fontaine et vue microscopique – photo : Christophe Laplace-Treuture.



◀ Photo 4 – Quelques éléments de l'appareil végétatif des characées nécessaires à la détermination : a) *Chara hispida* L. (grossissement x 40) ; b) *Nitella flexilis* Agardh (grossissement x 10) – photo : Elisabeth Lambert.

La finesse des structures à observer nécessite donc la récolte d'échantillons suffisamment propres et bien conservés (pas de vase, débris de bois ou autres plantes ; éviter les échantillons trop couverts par d'autres algues ; conservation dans de l'alcool à 60° ou du formol à 5 %). Une confusion est possible entre les characées et certains phanérogames à l'architecture générale proche et aux feuilles en forme de filaments comme les genres *Myriophyllum* ou *Ceratophyllum* : une observation à la loupe peut être nécessaire pour en faire la discrimination.

Types d'habitats

Les algues sont des organismes très ubiquistes. Les peuplements d'algues filamenteuses représentent une composante importante de la végétation aquatique fixée. Elles se rencontrent dans des milieux très diversifiés et participent à la dynamique spatiale et temporelle de ces milieux. Elles peuvent même dominer les peuplements de certains secteurs de cours d'eau (photo 5) ou de plans d'eau.

Elles colonisent des substrats très divers, souvent grossiers comme les blocs et galets, mais qui peuvent être aussi des vases comme pour certaines cyanobactéries.

Ces algues benthiques, fermement fixées au substrat, sont communément désignées sous le terme de périphyton, terme anglo-saxon désignant « l'ensemble des espèces (animales ou végétales) qui poussent autour d'un substrat » ou de phytobenthos. En référence au substrat colonisé par les algues, on peut distinguer cinq sous-groupes : l'épiphyton, représenté par la phytocénose algale

qui se développe sur des plantes aquatiques ou d'autres algues ; l'épilithon, fixé sur des substrats durs ; l'épipsammon, fixé sur des grains de sable ; l'épipélon, fixé sur de la vase ; ou l'épizoon, fixé sur des animaux.

Les algues benthiques sont sensibles au courant, qui peut influencer la forme de leurs colonies et peut les entraîner lorsqu'il augmente brusquement ou lors des divisions cellulaires, constituant le drift (Cazaubon, 1988). De grandes quantités peuvent ainsi se décrocher brutalement et créer des problèmes de colmatage de prises d'eau (Pierre, 1972).

Parmi les algues filamenteuses capables d'engendrer des proliférations (Peltre *et al.*, 2002), les cladophores (*Cladophora* sp., chlorophycée) dominent souvent les communautés algales benthiques d'eau douce, dans des milieux de qualité variable, et plus particulièrement en cours d'eau calcaire ou marno-calcaire. Leur habitat préférentiel, où elles peuvent être abondantes, consiste en radiers de faible profondeur, bien éclairés, à granulométrie grossière et à courant modéré régulier ou éventuellement rapide, et où la température de l'eau peut croître rapidement.

Les vauchéries (*Vaucheria* sp., xanthophycées) se rencontrent dans tous les types de cours d'eau, et notamment en cours d'eau calcaires ou marno-calcaires, où elles sont fréquemment associées aux cladophores, dont elles semblent se rapprocher au point de vue des caractéristiques écologiques. Elles sont également très fréquentes en aval des piscicultures (Daniel et Haury, 1995). D'autres espèces de vauchéries sont observées dans les eaux de bonne qualité alimentées par une résurgence (Rodriguez et Vergon, 1996).



▲ Photo 5 – Végétation de la Garonne dominée par les cyanobactéries
– photo : Christophe Laplace-Treyture.



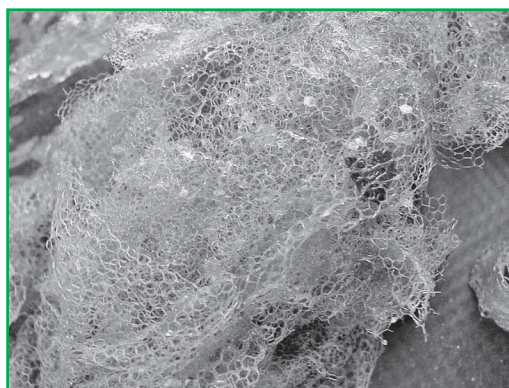
▲ Photo 6 – Zone calme de la Garonne, à Lamagistère, remplie d'*Hydrodictyon reticulatum* – photo : Christophe Laplace-Treyture.

Les *Spirogyra* sp. (chlorophycées) se maintiennent généralement sans fixation dans la tranche d'eau. Elles se développent au printemps, généralement dans les fossés, étangs et rivières aux eaux douces claires et calmes. Leur nature visqueuse peut parfois engendrer des asphyxies d'alevins lorsqu'elles prolifèrent en bassins de pisciculture.

Les développements d'*Hydrodictyon reticulatum* (chlorophycée) se produisent en faciès lentique, en plan d'eau (lacs, étangs), dans les anses calmes de certains cours d'eau (photo 6), ou encore dans les fossés et marais peu profonds. Leurs réticules de cellules peuvent créer un maillage dense dans la masse d'eau ou à la surface (photo 7).

Les biotopes dans lesquels se développent les characées (espèces pionnières, vernalles, c'est-à-dire printanières, ou estivales) peuvent être temporaires (assèchement estival) et peu profonds, ou relativement étendus avec des eaux plus ou moins profondes, permanentes, stables ou subissant des marnages. Du littoral vers l'intérieur des terres, des étages planitiaires aux étages alpins, ils sont variés : fossés, mares, étangs, lacs, ballastières, anciennes exploitations (de sables, graviers, galets ou tourbe) de profondeur variable (quelques centimètres à 20 m environ), dépressions diverses aménagées, canaux, annexes de fleuves ou rivières (bras morts) – (Lambert, 2002 ; Lambert et al., 2002 a-b), (photos 8 à 13).

Les habitats des characées sont généralement bien éclairés et sont liés à des eaux oligo-mésotrophes, non ou très peu polluées, légèrement acides à basiques. Les eaux peuvent être météoriques (provenant directement des précipitations) ou en lien avec des nappes phréatiques ou des cours d'eau



◀ Photo 7 – Structure en réseau d'*Hydrodictyon reticulatum* – photo : Christophe Laplace-Treytore.

proches. Elles peuvent aussi provenir du ruissellement. La plupart des characées sont présentes en eaux douces mais quelques espèces sont caractéristiques des eaux saumâtres (Corillon, 1994 ; Guerlesquin, 1992a ; Citoleux, 2005 ; Citoleux et al., 2007). Elles semblent assez indifférentes à la granulométrie du substrat (sable mêlé de galets, graviers, limons ou tourbe) mais se développent plus difficilement sur des fonds uniquement caillouteux ou rocheux.

La plupart des characées européennes ont besoin de la présence de calcium et sont réunies dans l'ordre des *Charetalia hispidae*. La permanence ou le caractère éphémère du milieu vont permettre de distinguer deux alliances (Lambert et al., 2002a), le *Charion fragilis* et le *Charion vulgaris* (tableau 1), alors que la salinité conduit à une troisième alliance : le *Charion canescentis*.

Dans les eaux plus acides à pauvres en calcaires dominant d'autres associations classées dans l'ordre des *Nitellalia flexilis*. Le pH³ de l'eau permet de distinguer deux alliances : le *Nitellion*

3. Potentiel hydrogène.

▼ Tableau 1 – Communautés à caractère éphémère et thérophytique, des eaux temporaires basiques, mésotrophes à légèrement eutrophes (alliance : *Charion vulgaris*).

Végétations plus ou moins précoces de printemps.	Milieus souvent temporaires, peu profonds, eaux alcalines et parfois saumâtres, pH jusque vers 7,7 : végétations à <i>Tolypella intricata</i> : fructification avril à mai ou juin puis à <i>Chara</i> sp. et <i>Nitella</i> sp. : fructification mai à septembre.
Végétations pionnières à développement surtout estival (fructification principalement entre juin et septembre).	Dépressions récentes, biotopes en voie de stabilisation (enclaves de lit majeur), étangs, milieux alcalins méso-eutrophes à eutrophes, parfois faiblement pollués, peu profonds sur substratum crayeux ou zones plus profondes sur sables mêlés de débris organiques, ruisseaux ou canaux à cours lents des régions calcaires : groupement pionnier souvent paucispécifique à <i>Chara vulgaris</i> . Milieux très alcalins, grandes profondeurs possibles ; substrats généralement calcaires ; eaux plus ou moins claires : groupement vicariant du précédent à <i>Chara contraria</i> .



Étangs



Mares



Milieux saumâtres



Rivières ou ruisseaux



Carrières ou anciennes gravières



Canaux

▲ Photos 8 à 13 – Quelques biotopes à characées – photos 8 à 11 et 13 : Elisabeth Lambert ; photo 12 : Olivier Gabory.

syncarpo-tenuissimae et le *Nitellion flexilis*, au sein desquels la période de développement des végétations et les profondeurs vont conduire à séparer plusieurs communautés ou associations

(végétations précoces des eaux très claires, végétations pionnières à développement surtout estival des strates aquatiques inférieures, etc.) – (Lambert, 2002 ; Lambert *et al.*, 2002 b).

Les deux ordres (*Charetales hispidae*, *Nitellales flexilis*) sont regroupés dans la classe des *Charetea fragilis* (Lambert, 2002 ; Lambert et al., 2002 a-b).

Biologie

La vie de ces algues macrophytiques est généralement brève et leur taux de croissance rapide (d'une à deux semaines à deux à trois mois). Cependant quelques algues encroûtantes, comme la rhodophyte, *Hildenbrandia rivularis*, peuvent avoir une vie plus longue de l'ordre d'une année (Cazaubon et Loudiki, 1985).

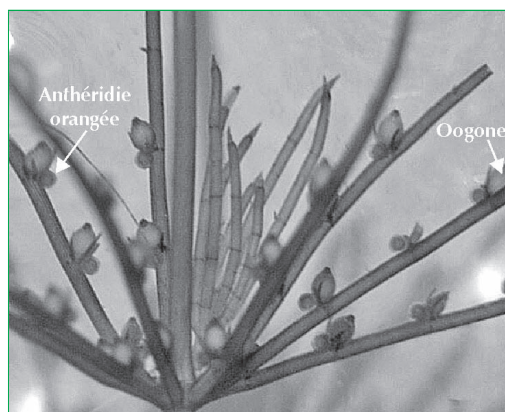
Les successions d'espèces sont naturellement liées aux changements saisonniers. Entrent également en jeu des phénomènes de compétition qui peuvent être compliqués par les impacts des modifications anthropiques des milieux.

Les characées ont des périodes de développement variable : certaines sont vernales (végétations précoces du tableau 1), d'autres sont plutôt estivales, enfin certaines espèces plus tardives, appartenant au *Nitellion syncarpo-tenuissimae*, sont automnales.

Les characées peuvent être monoïques ou dioïques (organes reproducteurs mâles, anthéridies et femelles, oogones sur deux individus différents). L'appareil reproducteur (photo 14) des characées est visible à l'œil nu ; il est nécessaire de pouvoir l'observer et donc de récolter des characées fructifiées pour réaliser une détermination spécifique précise.

Les characées constituent des végétations denses ou ouvertes (quelques cm² à 25 m² ou plus, de quelques cm à parfois 80 cm de haut), le plus souvent monospécifiques. Des peuplements pionniers peuvent apparaître dans des eaux mésotrophes peu profondes et ne se maintenir que quelques années. Lorsqu'elles existent, les végétations polyspécifiques restent toutefois peu diversifiées et ne comprennent, dans les milieux alcalins les plus favorables, que cinq ou six espèces. Les végétations de characées peuvent aussi être associées à des hydrophytes des genres *Potamogeton*, *Utricularia*, *Myriophyllum*, *Zannichellia*... Plusieurs strates végétales appartenant à différents types d'habitats peuvent alors coexister transitoirement quand débute la colonisation par ces hydrophytes.

Les charophycées peuvent aussi persister en tant que compagnes au sein d'associations variées des bordures des milieux aquatiques et sont alors



◀ Photo 14 – Divers éléments de l'appareil reproducteur des characées nécessaires à la détermination : *Chara globularis* Thuillier, espèce monoïque (grossissement x 10) – photo : Elisabeth Lambert.

les reliques d'une végétation de charophycées initialement exclusive (Lambert-Servien, 1995). Elles constituent dans certains cas les strates les plus profondes de la végétation macrophytique, formant parfois de vastes tapis ou prairies submergées de superficies très variables : dans certains lacs profonds aux eaux transparentes, elles peuvent s'implanter jusqu'à plus de 15 m de profondeur.

Les biomasses de characées sont évidemment très variables selon la densité de leurs herbiers. Les biomasses maximales sont de l'ordre de 500 g de matières sèches par m² mais présentent des variations interannuelles quelquefois importantes. Par exemple, les travaux de Van Den Berg sur le Veluwemeer (Pays-Bas) donnent, pour *Chara aspera*, des valeurs de pics de biomasse en fin d'été de 350 g en 1994 et d'environ 500 g en 1995 (Van Den Berg, 1999). Dans la même étude, le taux de croissance relatif de *C. aspera* en juin atteignait un maximum de 8 % par jour, ce qui correspond à une très forte productivité.

Plusieurs genres d'algues filamenteuses sont capables de développer des proliférations importantes (Peltre et al., 2002 ; Rodriguez et Vergon, 1996), surtout en milieu calcaire ou marno-calcaire à niveau trophique élevé. Les références existant au niveau français sur les estimations quantitatives sont peu fréquentes. Comme pour les autres algues filamenteuses, le critère le plus fréquent est le pourcentage de recouvrement qui peut largement dépasser les 50-70 % de surface sur une station. Les biomasses mesurées peuvent être très importantes, de l'ordre de 1 à 2 kg de poids frais/m², soit environ 100 g de poids sec au m², comme sur le Vair (Peltre et al., 1993). Mais elles peuvent atteindre des valeurs maximales

nettement supérieures, de l'ordre 300-600 g de poids sec/m² comme en Franche-Comté (Rodriguez et Vergon, 1996).

Hormis les impacts environnementaux que ces proliférations peuvent créer temporairement, dans certains cas de blooms de cyanobactéries, des libérations de toxines dans l'environnement peuvent se produire, engendrant des risques vis-à-vis de la santé humaine. Ces risques sont pris de plus en plus au sérieux par les autorités sanitaires. Tandeau de Marsac (2001) a précisé les différents types de cyanotoxines selon leur structure chimique :

- les peptides cycliques hépatotoxiques, les plus fréquents (microcystines et nodularines),
- les alcaloïdes : neurotoxiques (comme par exemple anatoxine-a, homoanatoxine-a, anatoxine-a(S) saxitoxines) et hépatotoxiques (comme la cylindrospermopsine),
- les lipopolysaccharides.

Les cycles saisonniers de développement des macro-algues sont variables avec, pour la plupart des algues filamenteuses, des croissances rapides pouvant parfois être fugaces. Leur cycle annuel est parfois bimodal, avec apparition de pics de production au printemps et en fin d'été. Ces pics de production peuvent être réduits ou annulés, par exemple par d'éventuelles crues printanières ralentissant fortement les développements précoces (Nauleau, 1988). Il peut y avoir également une compétition pour les nutriments avec les plantes supérieures, produisant une apparition tardive des algues, notamment sur les cours d'eau à renoncules, espèces à développement printanier précoce. Ce type de cycle a été par exemple mis en évidence dans les populations de *Cladophora glomerata* de la région du Haut-Doubs (Rodriguez et Vergon, 1996) et sur l'amont du Vair dans les Vosges (Peltre et al., 1993).

Facteurs environnementaux

Les algues macrophytiques jouent un rôle capital dans l'écosystème, en tant qu'habitats d'autres algues, de macro-invertébrés ou de poissons (cladophores hébergeant des simuliés, characées hébergeant des alevins). Elles ont une fonction auto-épuratrice, facteur améliorant la qualité des eaux. En revanche, elles peuvent provoquer des nuisances organoleptiques, en colorant les eaux (cas des cyanobactéries) ou en dégageant goûts et odeurs par libération de métabolites secondaires

(cas de très nombreuses espèces appartenant à différents groupes d'algues). En termes d'impact physique sur le milieu, leurs proliférations peuvent aussi modifier les écoulements de certains cours d'eau.

Les variations de facteurs environnementaux, physiques ou chimiques, comme l'éclairement, l'acidification, l'augmentation ou la forte diminution de la température et/ou des teneurs en nutriments, modifient profondément la composition des communautés (Nauleau, 1988). La biomasse de *Cladophora glomerata* peut diminuer de 74 % lorsque la teneur en matières en suspension augmente (Wilson et al., 1999). Des proliférations parfois importantes de macro-algues ont pu être observées sur des sites de grandes dimensions, comme sur le canal du Midi à l'est de Toulouse (Bosca et al., 1992) ou sur un affluent de la Meuse, le Vair, où l'on observait une composition quasiment monospécifique du peuplement (Peltre et al., 1993). Ce peuplement montrait des biomasses très élevées de *Cladophora* sp., conséquence des teneurs très élevées de phosphore dans le cours d'eau, de la déstructuration des habitats dans un contexte géologique marno-calcaire favorable à cette algue. Dans des systèmes de grands cours d'eau, comme la Garonne et la Dordogne, la présence du genre *Stigeoclonium* est nettement corrélée à l'augmentation des teneurs des eaux en nitrates (Laplace-Treytore, 2004).

Les cyanobactéries ont un rôle important dans le cycle de l'azote car elles sont capables de fixer l'azote atmosphérique, ce qui leur procure un avantage par rapport aux autres groupes algaux, et de le transformer en une forme organique NO₃⁴ ou NH₄⁵. Par la suite, ces formes de l'azote seront utilisées par les plantes.

Les conditions hydrologiques et les variations de niveau d'eau sont un facteur influençant très fortement l'installation et le développement des colonies d'algues filamenteuses benthiques et planctoniques (Barbe, 2002) : les crues ont souvent un fort impact de réduction des biomasses par arrachage des filaments, alors que de longues périodes de faibles débits, souvent corrélées avec un fort ensoleillement et une augmentation de la température, facilitent les proliférations algales. Ainsi, sur la Dordogne, les abondances des genres *Oedogonium* sp. et *Oscillatoria* sp. sont corrélées au maintien de faibles débits durant de longues périodes (Laplace-Treytore, 2004). *Hildenbrandia rivularis*, du fait de son organisation encroûtante, et *Lemanea gr. fluviatilis*, de par sa structure

4. Nitrate.

5. Ammonium.

bambusiforme, se retrouvent dans des zones de fortes profondeurs soumises à de fortes vitesses de courant (Breugnot *et al.*, à paraître).

Les travaux français permettant de compléter les connaissances relatives à la répartition, à la dynamique des *Characeae* et à l'impact des facteurs écologiques, sont variés : ils concernent le suivi de la répartition régionale des characées en lien avec les facteurs environnementaux (Guerlesquin *et al.*, 1990 ; Bornette *et al.*, 1994 ; Lambert-Servien *et al.*, 2006). Bonis *et al.* (2002), Grillas *et al.* (1993 a-b, 1998) et Combroux *et al.* (2001) ont pris en compte l'importance des banques d'oospores (formes de survie des characées aux conditions défavorables) et de propagules dans les substrats pour la reconstitution des végétations à characées dans les milieux plus ou moins temporaires ou instables. L'eutrophisation des milieux, la diminution de la transparence de l'eau, l'envasement et le développement des hélophytes, ont fait considérablement régresser ces communautés végétales. La création de milieux neufs (mares, gravières...) permet parfois l'installation de nouvelles végétations. La répartition des végétations benthiques à characées reste à compléter et à actualiser car elle est encore insuffisamment connue.

Bio-indication

Les problèmes d'eutrophisation des milieux et des proliférations végétales qui y sont souvent liées, ont induit des besoins en outils de diagnostic basés sur les analyses physico-chimiques « Système d'évaluation de la qualité des eaux » (SEQ Eau) et sur les éléments biologiques (SEQ Bio) de la part des gestionnaires des milieux aquatiques. Bientôt, l'évaluation se fera à l'échelle plus globale de la masse d'eau au sein du futur système d'évaluation de l'état écologique (S3E).

Les algues sont des organismes en lien direct avec la qualité de la phase aqueuse, et notamment avec son niveau trophique (Cazaubon *et al.*, 1999). Les algues épilithiques (algues fixées sur les substrats durs, tels que cailloux, galets, blocs, dalles) sont le groupe d'algues le plus étudié, en tant qu'organismes bio-indicateurs permettant d'apprécier la qualité de l'eau, notamment par le biais d'indices. Les macro-algues sont intégrées dans les calculs de l'indice biologique macrophytique en rivière, l'IBMR (Afnor, 2003), en tant qu'organismes faisant partie intégrante du compartiment macrophytique, notamment sous l'angle fonctionnel.

Les characées, dont certaines sont utilisées dans le calcul de l'IBMR, sont également proposées comme bio-indicateurs des connexions entre rivières et apports d'eaux souterraines (Bornette *et al.*, 1996 ; Bornette *et al.*, 2002) ou des activités anthropiques et de la qualité des eaux (Guerlesquin, 1985, 1992b ; Lambert-Servien *et al.*, 2006). Certaines d'entre elles ont été proposées comme « espèces déterminantes » (Guerlesquin *et al.*, 1999). Enfin, les charophytes fossiles peuvent servir de biomarqueurs pour la reconstitution des paléo-environnements lacustres (Soulié-Märsche, 2002).

Conclusion

Les algues sont présentes sous diverses formes dans la totalité des biotopes aquatiques. Elles sont également un des principaux éléments fonctionnels de la production primaire au sein des hydrosystèmes d'eau douce. Les macro-algues présentées ici, bien que plus rarement perçues que les autres macrophytes par le grand public, sont déjà largement intégrées dans les analyses du fonctionnement des hydrosystèmes et dans les prescriptions de gestion des milieux.

La relative difficulté de certaines déterminations et de l'approche de la systématique des algues, pourtant base de toute analyse environnementale à partir de ces organismes, est compensée par la disponibilité d'ouvrages de référence, mais nécessite toutefois une formation spécifique des observateurs.

Les connaissances déjà acquises sur leur biologie et leur écologie contribuent à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes qu'elles colonisent quelquefois de manière très importante : leurs proliférations font l'objet de suivis car elles causent de fortes nuisances dans certains cas et peuvent même présenter des risques pour la santé humaine dans le cas de proliférations de cyanobactéries pouvant produire des toxines.

Leur utilisation en bio-indication et dans la mise en place d'indices de qualité, comme l'IBMR, présente un grand intérêt dans la mesure où elle complète les indications données par les autres groupes de macrophytes, dont les phanérogames. Le cas particulier des algues characées, dont la plupart des habitats, quelquefois en nette régression sur le territoire métropolitain, sont d'un grand intérêt écologique, correspond à un regain d'intérêt en France, en lien direct avec les directives européennes récentes sur les habitats et l'eau. □

Résumé

Une synthèse de divers travaux relatifs aux macro-algues est proposée dans cette étude. Après avoir indiqué les ouvrages de référence servant à la systématique et rappelé quelques particularités de leur phylogénie, les auteurs décrivent certaines caractéristiques générales, morphologiques et biologiques des algues macrophytiques. À partir de nombreux articles ayant traité des divers habitats dans lesquels peuvent vivre les macro-algues, quelques biotopes sont exposés ici, avec une typologie plus détaillée des communautés à characées en fonction de la nature des eaux, de leur permanence et de la période de végétation. L'importance des facteurs environnementaux influençant la répartition des macro-algues ainsi que leur utilisation possible en tant que bio-indicateurs sont enfin présentées.

Abstract

A synthesis of different works related to macro-algae is proposed in this study. After having mentioned several references to systematical books and indicated some particularities about the phylogeny of macro-algae, the authors are giving a description of some main morphological and biological characteristics of macrophyte algae. Many reviews having treated of the different habitats where macro-algae can live, some biotops are presented here with a more detailed typology for *Characeae* communities, linked to water type, permanence and vegetation development period. The importance of ecological factors affecting their distribution and their possible use as bioindicators, are also presented.

Bibliographie

- AFNOR, 2000, Qualité de l'eau, *Détermination de l'Indice Biologique Diatomées (IBD)*, NFT 90-354, juin 2000, AFNOR, Saint-Denis, La Plaine, 63 p.
- AFNOR, 2003, *Qualité de l'eau – eau d'origine naturelle – Détermination de l'Indice Biologique Macrophytique en Rivière (IBMR)*, NFT 90-395, 28 p.
- BARBE, J., 2002, Influence des variations de niveau d'eau sur le développement de *Hydrodictyon reticulatum* et *Oedogonium* sp., in : *Proceedings 11^e Symposium EWRS*, Moliets et Maa (France), p. 81-82.
- BONIS, A., GRILLAS, P., 2002, Deposition, germination and spatio-temporal patterns of charophyte propagule banks : a review, *Aquatic Botany*, vol. 72, n° 3-4, p. 235-248.
- BONIS, A., GEMAYEL, P., GRILLAS, P., 1993, Polymorphisme enzymatique et morphologique comparé chez *Chara aspera* et *C. galioides* (*Charophyceae*) en Camargue, *Cryptogamie, Algol.*, vol. 14, n° 2-3, p. 115-131.
- BORNETTE, G., ARENS, M.-F., 2002, Charophyte communities in cut-off river channels. The role of connectivity, *Aquatic Botany*, vol. 73, n° 2, p. 149-162.
- BORNETTE, G., AMOROS, C., CASTELLA, C., BEFFY, J.-L., 1994, Succession and fluctuation in the aquatic vegetation of two former Rhône River channels, *Vegetatio*, vol. 110, p. 171-184.
- BORNETTE, G., GUERLESQUIN, M., HENRY, P.-H., 1996, Are the *Characeae* able to indicate the origin of groundwater in former river channels ?, *Vegetatio*, vol. 125, p. 207-222.
- BOSCA, C., DAUTA, A., 1992, Les algues filamenteuses dans le canal du Midi, in : *15^e conférence du COLUMA*, ANPP (Ed.), vol. 3, p. 1091-1099.
- BOURRELLY, P., 1981, *Les algues d'eau douces – Tome 2 : Les algues jaunes et brunes*, Éd. Boubée, Paris, 517 p.
- BOURRELLY, P., 1990a, *Les algues d'eau douce – Tome 1 : Les algues vertes* (2^e éd.), Éd. Boubée, Paris, 569 p.
- BOURRELLY, P., 1990b, *Les algues d'eau douce – Tome 3 : Les algues bleues et rouges*, Éd. Boubée, Paris, 512 p.
- BREUGNOT, E., DUTARTRE, A., LAPLACE-TREYTURE, C., HAURY, J., à paraître, Macrophyte local distribution and consequences on sampling methods in large river, *Hydrobiologia*.
- CAZAUBON, A., 1988, *Étude des peuplements d'algues en dérive et benthiques (épiphytes épilithiques et épipéliques) des rivières méditerranéennes (sud-est de la France et Corse)*, thèse d'état, université Aix-Marseille 3, 327 p.