



POLYTECH[®]
TOURS

Département
Aménagement et Environnement



Ecole d'ingénieurs
polytechnique
de l'université de Tours

CITERES
UMR 6173
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement

Projet de Fin d'Etudes

**Identification des impacts des
phénomènes de prolifération
macrophytique en grandes
rivières sur les compartiments
physique et chimique, la
biodiversité, et sur les usages**



COLIN Kévin

2016-2017

Directeur de recherche
RICHARD Nina

Identification des impacts des phénomènes de prolifération macrophytique en grandes rivières, sur les compartiments physique et chimique, la biodiversité, et sur les usages.

Nina RICHARD
2016-2017

Kévin COLIN

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur de cette recherche a signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

FORMATION PAR LA RECHERCHE ET PROJET DE FIN D'ETUDES EN GENIE DE L'AMENAGEMENT

La formation au génie de l'aménagement, assurée par le département aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ma tutrice de projet, Nina RICHARD, pour l'aide qu'elle m'a apportée dans la rédaction de ce mémoire, et le temps qu'elle a bien voulu accorder à sa relecture.

Table des matières

Introduction	8
I. Définition et contour du sujet.....	9
1. Les macrophytes aquatiques.....	9
2. Système aquatique concerné : les grandes rivières	10
II. Impact des proliférations macrophytiques.....	13
1. Définition du terme prolifération	13
2. Sur le compartiment physique	13
a. Modification des paramètres hydrauliques.....	13
b. Rétention des sédiments fins	16
c. Réduction de la bande active.....	19
d. Barrière pour la lumière	19
e. Modification de la température	19
3. Sur le compartiment chimique	20
a. Processus chimiques dans les sédiments accumulés	20
b. Modification des cycles chimiques de l'eau	22
c. Absorption et relargage d'éléments dans la colonne d'eau.....	24
4. Sur la biodiversité	25
a. Rétention des sédiments fins	25
b. Modification des paramètres hydrauliques.....	26
c. Les herbiers constituent un habitat	27
5. Sur les usages	28
a. Colmatage des prises d'eau.....	28
b. Dévalorisation des cours d'eau	32
c. Perturbation des activités de loisirs.....	33
Conclusion.....	35
Bibliographie.....	36

Introduction

Les macrophytes aquatiques d'eau douce forment au sein des hydrosystèmes continentaux un compartiment fonctionnel de premier ordre aux fonctions variées. Ce compartiment assure des fonctions majeures dans les cycles biogéochimiques et la productivité du milieu car cet espace constitue une zone d'interface clé.

Les macrophytes sont des végétaux aquatiques, ou semi-aquatiques, le plus souvent enracinés dans le sédiment, et constituent un substrat et un espace de vie privilégié pour de nombreux micro- et macro-organismes.

En raison des traits de vie et aptitudes physiologiques de certaines espèces de macrophytes, celles-ci sont en capacité d'exploiter les ressources disponibles du milieu afin de prospérer et de se développer, causant parfois des phénomènes de proliférations. Ces derniers sont amplifiés par des conditions trophiques détériorées, souvent caractérisées par des phénomènes d'hypertrophie, alimentés par des apports en nutriments largement en excès dans le milieu. De plus en plus, les nutriments ne représentent plus le facteur limitant la croissance des macrophytes, ce dernier étant remplacé par des phénomènes de compétition pour l'espace ou pour d'autres ressources comme la lumière.

Ce rapport résume les différents impacts des phénomènes de proliférations de macrophytes sur les compartiments physique, chimique du milieu, sur la biodiversité et sur les usages concernés par ces événements.

La première partie définit les contours et le contexte du sujet, et précise certains termes dont les limites ont une grande importance pour cerner les impacts des phénomènes de prolifération.

La deuxième partie s'intéressera, en intégralité, aux différents impacts, positifs ou négatifs des proliférations de macrophytes, identifiés dans la littérature scientifique lors des 40 dernières années.

I. Définition et contour du sujet

1. Les macrophytes aquatiques

Les recherches faites sur le sujet traité dans ce rapport concernent uniquement les macrophytes aquatiques. Il convient donc dans un premier temps de définir clairement ce terme et d'identifier les différentes nuances portées par les différentes définitions apportées au fil des années.

En 1977, HOLMES & WHITTON se penchent sur l'étude de végétaux aquatiques macroscopique, observables à l'œil nu et facilement identifiables à l'observation. C'est ainsi qu'ils définissent les macrophytes aquatiques. Cette définition est essentiellement portée sur la taille de l'organisme sans aucune distinction d'ordre taxonomique.

Plus tard, WIEGLEB (1988) apporte une nuance liée à la caractéristique aquatique du milieu et précise les taxa concernés : « les macrophytes aquatiques désignent des végétaux macroscopiques se développant entièrement ou partiellement dans un milieu aquatique ». L'auteur propose également plusieurs classifications permettant de distinguer les macrophytes aquatiques du reste des végétaux aquatiques :

- On peut distinguer les macrophytes par leur appartenance à différents groupes taxinomiques. En effet nous trouvons aussi bien des phanérogames (*Ranunculus*, *Potamogeton*...), que des bryophytes (*Fontinalis*, *Cinclidotus*...), des ptéridophytes (*Azolla*), et des algues filamenteuses (*Cladophora*), le cas des colonies de cyanobactéries (*Oscillatoria* sp.) étant controversé.
- La classification peut aussi être définie suivant l'écologie des macrophytes. LUTHER (1949) classe ainsi les macrophytes en plusieurs groupes : haptophytes (végétaux attachés mais ne pénétrant pas le substrat), rhizophytes (plantes possédant des structures basales qui pénètrent le substrat) et planophytes (espèces flottant librement).

Ces dénominations apparaissent cependant désuètes et HAURY (1992) propose une classification synthétique de ces types éco-morphologiques en prenant en compte les

relations entre la morphologie des végétaux, les conditions de submersion et leur relation au substrat.

Trois grandes entités éco-morphologiques sont alors définies :

- Les héliophytes (Figure 1-A), composée par les plantes dont les racines et la base de la tige se trouvent presque constamment immergées mais dont les feuilles et les inflorescences s'élèvent au-dessus de l'eau.
- Les hydrophytes (Figure 1-B), comprenant les espèces totalement submergées (se reproduisant dans l'eau) ou ayant des feuilles flottantes (développant leur appareil végétatif dans la colonne d'eau ou à sa surface). Ces dernières peuvent être ancrées au fond ou flotter librement (captant directement les nutriments dans l'eau).
- Les amphiphytes (Figure 1-C), pouvant supporter les deux types de conditions, c'est-à-dire, se développer aussi bien sur la terre que dans l'eau.

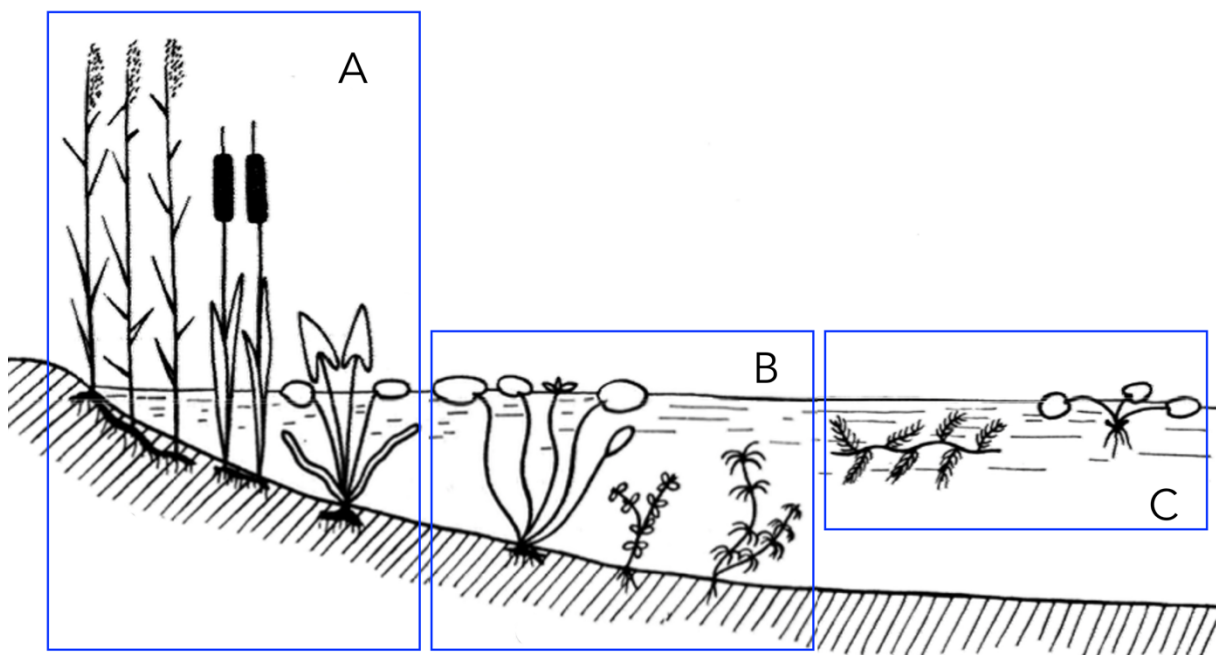


Figure 1 : Représentation des différents types de macrophytes.

2. Système aquatique concerné : les grandes rivières

Ce rapport s'intéresse aux macrophytes évoluant en milieux aquatiques continentaux courants, les plus en aval des hydrosystèmes : les grandes rivières. Il est important de

préciser les notions physiques, hydrologiques et biologiques sous-entendues par ce terme générique aux limites imprécises. En effet, plusieurs définitions et typologies des cours d'eau ont été proposées au cours du temps, en se basant le plus souvent sur gradient unidirectionnel amont-aval.

Une typologie est proposée par STRAHLER en 1957, basée sur la relation des cours d'eau au sein d'un réseau, en leur attribuant un coefficient d'ordination. Le principe est simple : deux tronçons de même ordre (n) qui se rejoignent forment un tronçon d'ordre supérieur ($n+1$), tandis qu'un segment qui reçoit un segment d'ordre inférieur conserve le même ordre (Figure 2).

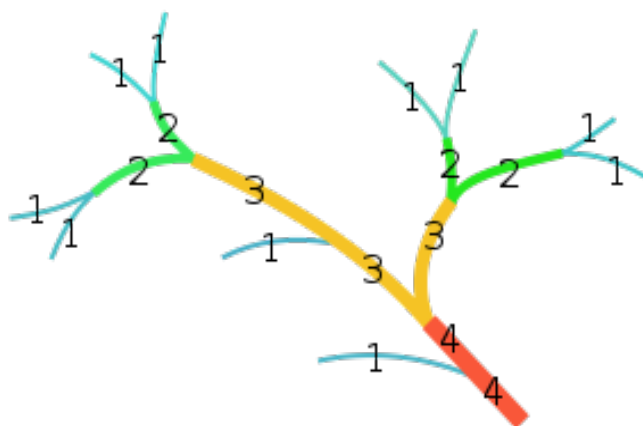


Figure 2 : Schéma illustrant le principe de la classification de Strahler.

Cette classification est reprise par la Directive Cadre Européenne (DIRECTION DE L'EAU, 2005) afin de regrouper les coefficients d'ordination selon la taille effective des cours d'eau :

Taille des cours d'eau	Coefficient de drainage
Très petit	1 à 2
Petits	3
Moyens	4
Grands	5
Très grands	6 à 8

Nous considérerons dans ce rapport comme « grandes rivières », les cours d'eau ayant un coefficient de drainage supérieur à 5 (Tableau 1).

AMOROS & PETTS (1993) introduisent un gradient longitudinal fondé sur les caractéristiques géomorphologiques et écologiques des cours d'eau, aboutissant à une typologie en trois secteurs :

- La zone de production des alluvions dans la partie supérieure des cours d'eau (forte pente, faible largeur et faible débit mais fort courant, phénomènes d'érosion très importants)
- La zone de transfert : transfert de l'eau et des matériaux vers l'aval (la pente et les vitesses diminuent, la largeur et le débit augmentent)
- La zone de stockage des matériaux transportés : elle présente classiquement une très faible pente qui provoque un ralentissement des écoulements, des dépôts de matériaux, formant de larges plaines alluviales.

D'autres typologies ont été proposées, et notamment basées sur la faune piscicole des cours d'eau, et ont permis d'en établir une typologie associée aux cortèges présents et relié aux grandeurs physiques du cours d'eau. Ainsi HUET (1949) présente une classification en considérant que des cours d'eau présentant la même largeur, la même profondeur et des pentes similaires ont des populations piscicoles comparables. De l'amont à l'aval, nous retrouvons les zones à truites, à ombres, à barbeaux et à brèmes. Les « grandes rivières » concernent les zones les plus en aval, c'est à dire les zones à barbeaux et à brèmes.

En France, il n'existe aucune zonation des cours d'eau basée sur les macrophytes aquatiques, probablement pour des raisons économiques (en comparaison à l'attrait général pour les espèces piscicoles). Cependant, des travaux réalisés en Angleterre (HOLMES et *al.*, 1998) ont proposés une classification des cours d'eau britanniques à partir des macrophytes. Cette classification aboutit à la formation de quatre groupes principaux, de A à D, représentant un gradient allant des rivières des plaines eutrophes à celles de tête de bassin, essentiellement torrentielles et oligotrophes. Cependant, la transposition avec les cours d'eau français n'apparaît pas évidente. En effet, les dimensions des cours

d'eau britanniques utilisés pour caractériser les cours d'eau les plus en aval dépassent rarement 20 m de large et 1 m de profondeur. Ces dimensions sont très inférieures à celles des grands cours d'eau des plaines françaises.

II. Impact des proliférations macrophytiques

1. Définition du terme prolifération cette partie est à mettre en l

Le terme de prolifération est communément employé pour décrire des développements jugés excessifs d'espèces végétales ou animales. PARENT (1991) définit ce terme pour les espèces végétales comme étant « l'apparition d'une production surnuméraire » d'un organisme qui en est alors initialement dépourvu. ROBERT (1971) oriente sa définition sur le cycle de vie des organismes et plus particulièrement sur la « multiplication rapide des êtres vivants ». Selon ce même auteur, la prolifération est alors synonyme de « se multiplier en abondance, [...] pulluler ». Cependant, cette définition est dotée d'une connotation assez négative, puisque l'auteur l'emploie pour des espèces exotiques à caractère envahissant.

Le Groupement d'Intérêt Scientifique Macrophytes (1997) définit les proliférations comme étant des phénomènes caractérisés par leur dynamique de population : « une plante proliférante est une espèce occupant rapidement un site donné, en colonisant les habitats disponibles, souvent au détriment des espèces présentant une moindre vitalité ». Il y a également derrière cette définition une notion d'extension de l'aire de répartition biogéographique d'une espèce, indiquant une progression spatiale.

2. Sur le compartiment physique

a. Modification des paramètres hydrauliques

Les processus de prolifération des macrophytes conduisent à la formation d'herbiers, souvent denses, pouvant être considérés comme des entités relativement homogènes du point de vue de l'organisation ou de la structure, mais surtout au regard

de la cohérence hydraulique (SAND-JENSEN & PEDERSEN, 1999). LUHAR et al. (2008) suggèrent que la meilleure unité d'étude et de prise en compte de l'impact des herbiers sur les écoulements est la surface frontale d'herbier développée par unité de volume.

Une étude (CHAMION & TANNER, 2000) menée sur des cours d'eau de plaine de Nouvelle-Zélande a montrée qu'en période d'étiage, les herbiers de macrophytes ont eu un impact majeur sur les vitesses d'écoulement au sein du chenal. En effet, les auteurs ont estimés une réduction des vitesses d'écoulement de 41 % en moyenne. Aussi, il a été mis en évidence la relation linéaire positive entre la rugosité du lit (coefficient de rugosité de Manning) et l'abondance relative de macrophytes.

Cependant, les modèles de calcul de cet effet de résistance joué par les macrophytes évoluent constamment du fait de la complexité d'intégration de multiples paramètres et en raison du contraste entre conditions théoriques en laboratoire et conditions *in-situ*.

GREEN (2005) a développé un modèle prédictif de la résistance à l'écoulement engendré par les herbiers de macrophytes, en prenant en compte la taille des macrophytes, leurs propriétés structurales (agencement, résistance, rigidité...), leur emplacement dans le canal et des conditions d'écoulement local. Ce modèle théorique démontre que la relation entre la résistance à l'écoulement du canal et la proportion du canal occupé par des macrophytes est non linéaire, contrairement à ce qui était avancé par CHAMION & TANNER (2000). Selon l'étude de GREEN, le paramètre déterminant concernant la résistance à l'écoulement est la répartition spatiale des macrophytes au sein du chenal. Pour étudier cette résistance, l'auteur décrit la relation chenal-résistance au travers de trois « facteurs d'obstruction ». Le premier intègre l'obstruction en coupe transversale et représente la fraction de la section occupée par les macrophytes. Le second facteur est un facteur de surface, symbolisé par la proportion de la surface horizontale occupée par les macrophytes. Enfin, le dernier facteur est lui volumétrique. Il représente la fraction du volume du chenal contenant des macrophytes. Ces trois facteurs ont été comparés à l'aide de mesures de terrain effectuées sur trente-cinq sites contenant l'espèce *Ranunculus fluitans*. Les résultats sont sans appel et indiquent une relation linéaire positive entre chaque facteur d'obstruction et le coefficient de résistance de Manning.

L'étude de JENSEN & PEDERSEN (1999), s'intéresse à l'évolution de la vitesse du courant et la turbulence engendrée par les herbiers de macrophytes (basée sur trois espèces : *Callitriche cophocarpa*, *Elodea canadensis* et *Sparganium emersum*). Les auteurs ont observés dans un premier temps une constance de la vitesse d'écoulement au sein des « canopées » de macrophytes.

De façon logique, c'est au niveau de la surface des herbiers que les profils de vitesse sont abrupts avec une baisse significative de la vitesse d'écoulement au niveau de cette interface.

Cependant les auteurs relèvent la présence de profils de vitesse moins escarpés pour une des espèces étudiées. Cette différence de pente des profils de vitesse est due à la structure formée par les macrophytes au niveau de la périphérie de la canopée : certaines espèces de macrophytes forment une structure de blindage, densément ramifiée et avec des valeurs de biomasse élevée. Alors que d'autres espèces forment des canopées plus « ouvertes », avec une biomasse plus homogène et distribuée tout le long de la structure végétale.

Cette étude analyse également un autre paramètre influencé par la présence des herbiers de macrophytes : la turbulence. Les auteurs concluent que ce paramètre augmente proportionnellement avec la vitesse moyenne de l'écoulement. Cependant, la relation vitesse moyenne-turbulence est plus ou moins forte selon l'espèce considérée (influence de la morphologie et la structure végétale).

Les herbiers de macrophytes ont donc un impact fort sur les vitesses d'écoulements dans les cours d'eau puisqu'ils engendrent de fortes diminutions des vitesses et une dissipation des turbulences.

Ce constat engendre d'autres conséquences assez évidentes. En effet, puisque les herbiers sont des éléments contraignants les écoulements, leur présence va logiquement entraîner une rehausse de la ligne d'eau (DAWSON & KERN-HANSEN, 1979). Cette variation du niveau d'eau a déjà posé des problèmes et notamment en rompant la relation débit-hauteur d'eau (tarage) au niveau de plusieurs stations de mesure de débit (SURUGUE, 1997).

Un effet opposé à celui décrit précédemment, concernant les vitesses d'écoulement, peut également être observé. Certains herbiers ne forment pas une structure unique et cohésive, mais plutôt un ensemble de « coussins » plus ou moins rapprochés les uns des autres. Si la vitesse d'écoulement est effectivement ralentie à l'intérieur et à proximité directe de ces coussins, les vitesses d'écoulement seront accélérées au niveau des zones d'écoulement entre les macrophytes, formant des « veines » de courant (HAURY & BAGLINIÈRE, 1996).

Partant de cette observation, ROUSSEL *et al.* (1998) ont tentés de mesurer l'impact des herbiers de macrophytes (*Renoncule aquatique*) en terme de dérivation et de canalisation de l'écoulement au sein du chenal. Les auteurs se sont intéressés plus particulièrement aux faciès de type radier, sur lesquels ils ont retirés tout les macrophytes implantés sur une des moitiés du radier.

Leur conclusion permet d'estimer l'accélération des vitesses d'écoulements au niveau des zones où les macrophytes ont été arrachées à hauteur de 60 % (en comparaison au radier entièrement et naturellement végétalisé).

On imagine donc facilement l'impact des herbiers de macrophytes sur la répartition des écoulements au sein des cours d'eau et l'impact que cela peut avoir, notamment sur les processus érosifs (à relativiser avec les caractéristiques sédimentaires locales). Il semblerait que ce processus de détournement des écoulements se produise lorsque les macrophytes occupent au moins 40 % de la surface du lit (GHISALBERTI & NEPF, 2009) et lorsque les macrophytes occupent densément les berges du chenal (GURNELL *et al.*, 2006). Ces processus peuvent entraîner une modification durable de la morphologie du chenal et une érosion accrue des berges (GREEN, 2006).

Cependant, cette implantation permet de diversifier les vitesses écoulement au sein du chenal.

b. Rétention des sédiments fins

Les processus d'érosion / transport / dépôt des sédiments représentent des caractéristiques fondamentales dans le fonctionnement des cours d'eau. Le phénomène

de dépôt des sédiments, bien que naturel, attire de plus en plus l'attention de la communauté scientifique en raison de l'influence néfaste des activités humaines (agriculture, urbanisation des bassins versants, déforestation...) qui libère des quantités importantes de sédiments fins ($\varnothing < 2 \text{ mm}$) et de particules organiques fines (JONES et *al.*, 2011).

En conséquence aux effets engendrés par les herbiers de macrophytes sur les vitesses d'écoulement, évoqués lors de la section précédente (i.e. diminution significative des vitesses d'écoulement au sein, et à proximité directe des herbiers, et dissipation des turbulences), de nombreuses études ont étudié et montré l'implication des herbiers de macrophytes dans l'accumulation de sédiments inorganiques et organiques fins.

En effet, les herbiers de macrophytes entraînent une dissipation de l'énergie turbulente, créant des zones à faible vitesse ainsi qu'une contrainte de cisaillement du lit qui favorise le dépôt des particules organiques et inorganiques fines (BARKO et *al.*, 1991).

De nombreuses études ont étudié les paramètres modulants la rétention des sédiments, permettant de mettre en évidence la prépondérance de quatre facteurs : la morphologie de l'espèce considérée, la flexibilité et la densité des tiges, et la résistance des végétaux (GURNELL et *al.*, 2006).

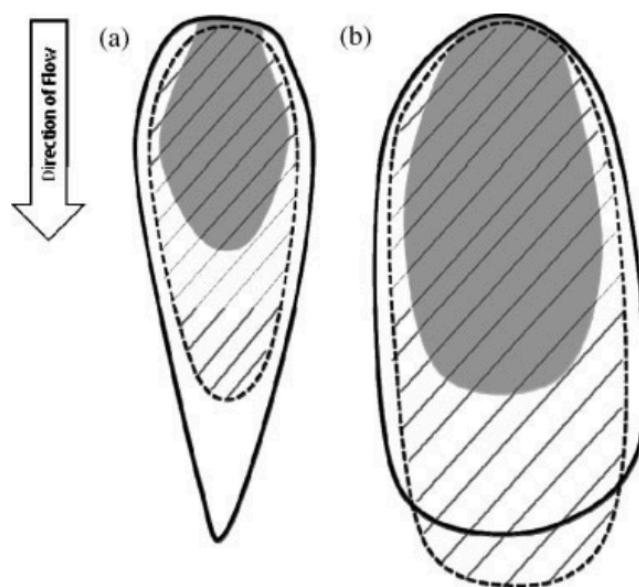


Figure 3 : Représentation d'herbiers de macrophytes immergés, avec la zone d'enracinement (foncée) et la zone de dépôt de sédiments fins (hachurée) (JONES et *al.*, 2011). Les morphologies obtenues varient selon l'ancrage des macrophytes et les conditions d'écoulement .

Ces paramètres, associés aux conditions locales d'écoulement, vont conditionner la morphologie des formes sédimentaires obtenues ainsi que le volume de sédiment stocké (Figure 3). On retrouve sous la forme (a) les espèces flexibles et / ou des conditions d'écoulement rapides, provoquant une érosion à la queue de l'herbier. Les herbiers prennent la forme (b) lorsque l'espèce est moins souple et / ou des conditions d'écoulement lenticules. Le plus souvent, nous observons un différentiel des vitesses d'écoulement important entre la queue du cône de dépôt et l'extérieur de l'herbier, entraînant des flux secondaires et des tourbillons formant des encoches érosives latérales. (JONES et *al.*, 2011).

Le taux de dépôt sédimentaire varie selon les espèces, la taille des herbiers, et les conditions locales d'écoulement, entre autres, mais les études de TRIMMER et *al.* (2009), WHARTON et *al.* (2006), et HEPPELL et *al.* (2009) sur l'espèce *Ranunculus penicillatus subsp. pseudofluitans* ont permis d'estimer des taux d'accumulation allant de 1 à 66,8 kg de sédiment / m² / an.

Les formes sédimentaires ainsi créées entraînent des modifications de la morphologie du lit, qui, associé aux effets de détournements des écoulements (cf. II.2.a.) peuvent provoquer une profonde évolution de la morphologie du lit, en terme de qualité et de structure (CORENBLIT et *al.*, 2007) à long terme.

Cependant, ce phénomène de stockage des sédiments fins n'est pas continu dans le temps. En effet, de nombreuses espèces de macrophytes possèdent des cycles biologiques annuels ou pluriannuel (dans ce cas, les végétaux conservent des structures de dormance enfouies dans le sédiment) et subissent des fluctuations saisonnières de biomasse à mesure qu'elles croissent, puis dépérissent à l'automne ou après la floraison. Ces fluctuations de biomasse se traduisent par une variation saisonnière du taux d'accumulation, généralement avec des taux élevés à la fin du printemps et au début de l'été, suivis d'une érosion intense du matériel accumulé au cours de l'automne et de l'hiver. De plus, les herbiers ne sont pas capables de retenir les sédiments lors des épisodes de crues (DAWSON et *al.*, 1978 ; CHAMPION & TANNER, 2000).

c. Réduction de la bande active

Le développement de macrophytes (et surtout d'hélophytes) au niveau des bords des cours d'eau peut engendrer une diminution de la bande active (partie du lit en eau pour des débits compris entre le module et la crue de pleins bords et constituée de bancs alluviaux peu ou pas végétalisés). Cette zone a un rôle majeur de stockage temporaire de la charge alluviale de fond en transit (MALAVOI & SOUCHON, 1996).

d. Barrière pour la lumière

Les grands herbiers de macrophytes peuvent couvrir d'importantes surfaces, créant ainsi un écran occultant, plus ou moins dense. En effet, l'atténuation de la pénétration de la lumière est un phénomène bien connu qui réduit fortement les capacités photosynthétiques des végétaux sous-jacent (WESTLAKE, 1966). Cette compétition pour la ressource lumineuse peut s'appliquer aussi bien pour les autres espèces de la communauté macrophytique que pour les individus à l'origine de l'ombrage (auto-ombrage).

Cet ombrage peut réduire considérablement la quantité de rayons atteignant les macrophytes benthiques. Par exemple, un herbier de Lentilles d'eau diminue de plus de 80 % la quantité de lumière perçue par les plantes immergées, ce qui peut conduire à leur régression, voire à leur disparition (PELTRE et *al.*, 2002).

e. Modification de la température

En raison de l'impact des herbiers de macrophytes sur les grandeurs physiques évoquées dans les sections précédentes (i.e. diminution des vitesses d'écoulement et diminution de la lumière qui parvient à pénétrer l'eau), il semblerait que la température de l'eau soit localement modifiée. Peu de travaux publiés se sont intéressés à ce phénomène, cependant il paraît assez logique que les herbiers engendrent un abaissement local de la température, ou du moins, empêche une élévation de la température. JUGET & ROSTAN (1973) ont mis en évidence l'existence de gradients thermiques marqués dans les herbiers de macrophytes en lac.

L'hypothèse peut être faite que des gradients semblables se mettent en place au niveau des faciès d'écoulement lenticules ou bien au niveau d'annexes hydrauliques. PELTRE et *al.* (2002) évoquent des gradients dépassant parfois 10°C, au niveau d'herbiers immergés partiellement couverts en surface par des algues filamenteuses.

3. Sur le compartiment chimique

a. Processus chimiques dans les sédiments accumulés

Les formes sédimentaires créées, en raison de l'implication des herbiers dans la rétention des sédiments fins inorganiques et organiques (cf. II.2.b.), contiennent des concentrations relativement élevées en nutriments. En effet, les sédiments fins ont tendance à avoir une grande disponibilité en nutriments inorganiques et en matières organiques biodisponibles (STUTTER et *al.*, 2007).

Au fur et à mesure que les particules fines sédimentent sous les herbiers, l'oxygène tend à diminuer, puis à disparaître au sein de ces sédiments fertiles en raison du faible diamètre des particules, et donc de la faible porosité du milieu. En conditions anaérobies, ce sont donc les processus de minéralisation de la matière organique (bactéries réductrices) qui prédominent. Le milieu étant réducteur, le pH et le potentiel redox sont clairement orientés et le comportement des nutriments et molécules organiques est dirigé :

- L'azote organique contenu dans les sédiments peut être minéralisé (dénitrification) en diazote gazeux N_2 (FAAFENG & ROSETH, 1993), lorsque le milieu est fortement anoxique. En milieu riche en matière organique, en azote, et en particules fines, la dénitrification peut entraîner la libération d'oxydes nitriques et nitreux, molécules solubles et acidifiantes.
- Lorsque les sédiments sont plus labiles et hétérométriques, les conditions anoxiques sont moins prononcées, ou seulement temporairement. Dans ce cas l'azote peut être stocké sous sa forme ammoniacale (NH_3) ou nitrate (NO_3). Ces deux dernières formes sont assimilables par les macrophytes. C'est pourquoi cette accumulation dans les sédiments, parcourus par les systèmes racinaires des macrophytes, permet une assimilation préférentielle pour certaines espèces,

comme *Ranunculus penicillatus ssp.* (TRIMMER et al., 2009).

- Les sédiments, le plus souvent riches en particules organiques fines et pauvres en oxygène, sont un lieu privilégié de fermentation, produisant ainsi du méthane CH_4 . SANDERS et al. (2007) ont décelés un mécanisme essentiel d'évacuation du méthane : ce dernier est en grande partie évacué vers l'atmosphère par les aérénchymes des macrophytes.
- Au niveau des 20-30 premiers centimètres du sédiment, les conditions oxiques, et donc le pH, permettent la décomposition du phosphore organique et l'adsorption de l'orthophosphate produit (MARTINOVA, 1993).

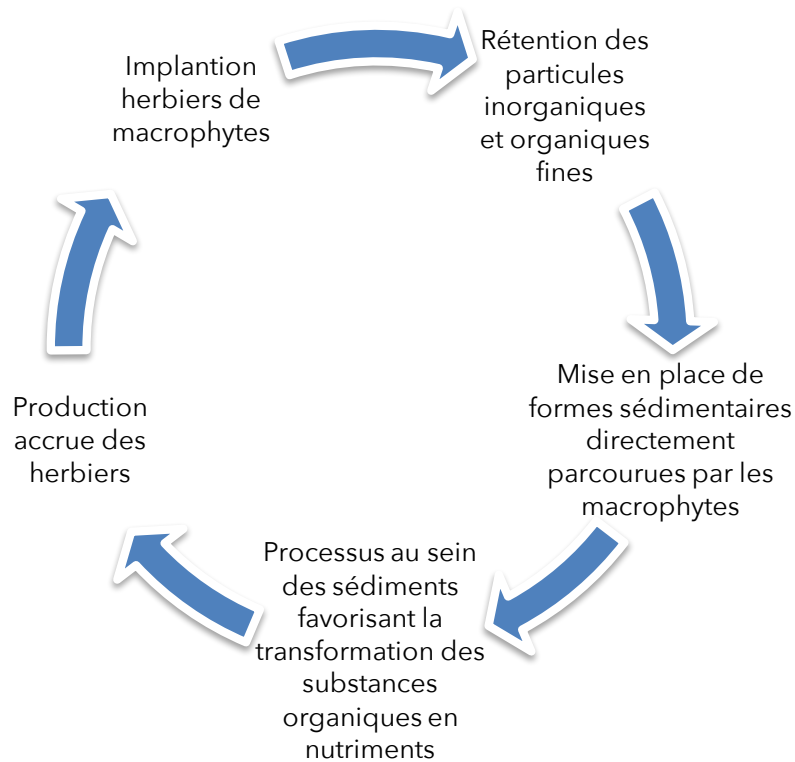


Figure 4 : Boucle de rétrocontrôle positive mise en place lors de l'implantation d'herbiers de macrophytes.

L'ensemble de ces processus engendre des modifications relatives à la disponibilité des nutriments : l'azote devient largement excédentaire (plus qu'il ne l'était à l'origine) dans les sédiments (THOMAZ et al., 2007), alors que le phosphore, facteur limitant de la croissance des macrophytes en eau douce, voit sa concentration et sa biodisponibilité augmentée. Ces changements peuvent conduire à une production accrue des

macrophytes (CARRE & CHAMBERS, 1998), alimentant une boucle de rétrocontrôle positif (Figure 4).

b. Modification des cycles chimiques

En systèmes aquatiques d'eau douce courants, l'oxygène connaît un cycle diurne fortement influencé par les organismes photosynthétiques et la productivité du milieu : les valeurs maximales de concentration en oxygène sont observées durant le jour et les minimales en fin de nuit (O'CONNOR & DI TORO, 1970).

Ce cycle diurne est essentiellement influencé par deux des caractéristiques fondamentales des macrophytes :

- L'activité photosynthétique (autotrophie) est un processus physiologique producteur d'oxygène dissous, directement libéré dans le milieu et responsable de l'augmentation de la concentration en oxygène en rivière (LIVINGSTONE, 1991).
- L'activité respiratoire des végétaux remplace l'activité photosynthétique lorsque cette dernière n'est plus opérationnelle (nuit). C'est un processus consommateur d'oxygène dissous et libérateur de CO₂. BENGEN *et al.* (1992) ont montrés l'existence d'une relation négative entre le taux de présence d'organismes photosynthétiques et le pourcentage matinal de saturation en oxygène : plus il y a de végétaux aquatiques, moins le taux de saturation en oxygène dissous est élevé.

En conditions « normales », c'est à dire en l'absence de phénomènes de proliférations de macrophytes, le système tend à assurer des concentrations en oxygène qui n'affectent pas l'équilibre biologique. En revanche, la présence d'herbiers de macrophytes tend à modifier significativement le cycle journalier de l'oxygène dissous. Des amplitudes importantes sont mesurées dans, et à proximité des herbiers : en fin de journée, des phénomènes de sursaturation (par rapport à la concentration maximale relative à la température, paramètre conditionnant la solubilité de l'oxygène), pouvant atteindre localement des valeurs de 250 %, sont régulièrement observées. En revanche, on observe systématiquement des sous-saturation matinales plus ou moins prolongées, pouvant durer plusieurs heures (AREA, 1993 ; GOSSE, 1989). Des phases d'absence totale d'oxygène peuvent être même observées au sein des herbiers (PELTRE *et al.*, 2002).

Les phénomènes ponctuels et marqués d'hypoxie et / ou d'anoxie, amènent l'équilibre chimique du milieu, dirigé par le pH, à se décaler. En effet, la valeur de pH du milieu est très liée au taux d'oxygénation de l'eau : entre le matin et le soir, on peut observer une variation du pH de plus de deux unités en moins de 12 heures (PELTRE *et al.*, 2002).

Ces variations tendent à rompre l'équilibre de certains systèmes chimiques, notamment le système carbonate (NOISETTE, 2013) : lors des phases d'hypoxie, la concentration en CO_2 dissous est élevée et entraîne une augmentation de concentration en H^+ et HCO_3^- suite à la dissolution de l'acide carbonique H_2CO_3 (Figure 5).

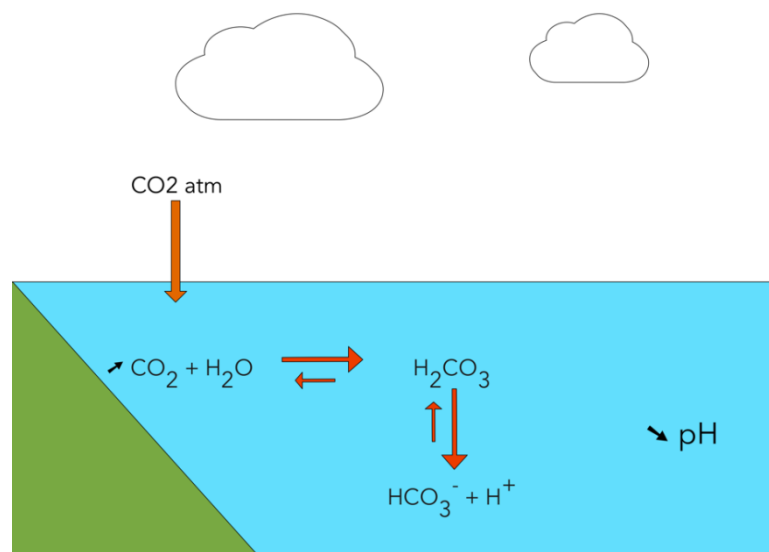


Figure 5 : Illustration de l'évolution du système carbonate avec une concentration élevée en CO_2 . Les flèches plus grosses indiquent le sens de déplacement de l'équilibre et la diminution du pH induite par l'augmentation des ions H^+ (Kévin COLIN).

A contrario, lors des phases d'hyperoxie et de consommation du CO_2 dissous par les végétaux, l'équilibre du système carbonate tend à se décaler dans le sens opposé : l'acide carbonique ne va plus se dissoudre mais précipiter et consommer une grande quantité d'ions H^+ . Cela va engendrer une augmentation du

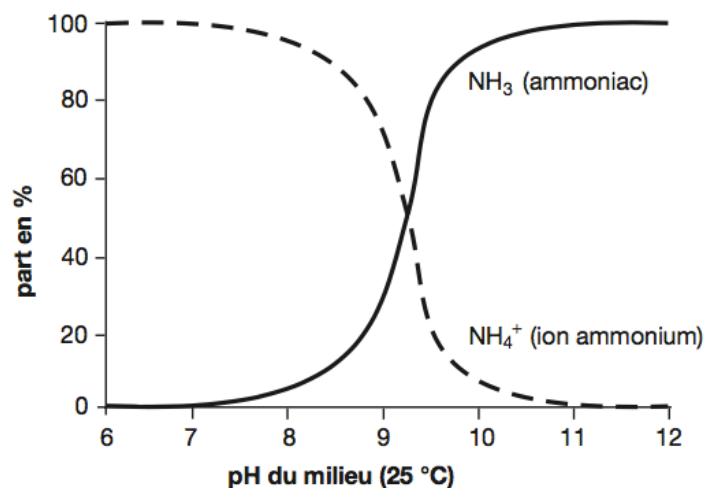


Figure 6 : Relation entre le pH et l'équilibre ammoniac-ammonium (SCHLEICHER, 2007).

pH aqueux et déstabiliser le rapport ammoniac / ammonium (Figure 6).

Même en faible concentration, l'ammoniac est toxique pour les peuplements piscicoles, entre autres. Cela peut entraîner des événements de forte mortalité comme sur la Semois en Belgique (VAN DER BORGHT et *al.*, 1982) ou sur la Loue (SRAE FRANCHE-COMTÉ, 1988).

c. Absorption et relargage d'éléments dans la colonne d'eau

En raison de leur activité physiologique, les herbiers absorbent et / ou rejettent plusieurs éléments dans le milieu environnant :

- Les macrophytes à croissance active libèrent en moyenne 1 à 10% (en masse) du carbone fixé par photosynthèse dans l'eau sous forme de composés organiques dissous (WETZEL, 1969). Cette matière organique contribue au métabolisme des bactéries et microorganismes épiphytes colonisant la surface des macrophytes (ALLEN, 1971)
- Concernant le phosphore, son absorption se fait principalement par le système racinaire (cf. II.3.a.) des macrophytes, au niveau des sédiments. L'absorption par le « feuillage » est relativement faible. SMITH (1978) relève que, contrairement au carbone, le relargage du phosphore est un flux mineur tant que les macrophytes sont en vie.
- L'absorption de l'azote est faite, là aussi au niveau du système racinaire, mais également au niveau des structures végétales qui occupent la colonne d'eau. Les taux d'absorption sont variables selon les espèces, mais les herbiers de certaines espèces de macrophytes (*Elodea canadensis* par exemple) sont capables de retenir de grande quantité d'azote en raison de leur forte productivité. (MARS et *al.*, 1999).

De manière générale, les proliférations de macrophytes abaissent les concentrations en nutriments (azote et phosphore), et peuvent même entraîner des carences en nutriments dans l'eau, surtout en phosphores (VAN DER BORGHT et *al.*, 1982).

Au-delà des nutriments, la végétation aquatique peut aussi séquestrer de manière

significative des métaux lourds, comme l'arsenic, le mercure et le plomb (WINDHAM et *al.*, 2003).

L'absorption des nutriments au sein de la colonne d'eau est optimisée en raison de l'effet de contrainte hydraulique réalisée par les herbiers (cf. II.2.a.) (SAND-JENSEN & MEBUS, 1996). La réduction de la vitesse d'écoulement permet d'augmenter le temps de traversé de l'herbier, et la turbulence résiduelle suffit à brasser efficacement l'eau et les solutés qu'elle contient. Ce processus permet d'améliorer le rendement photosynthétique car l'apport en nutriments n'est plus le facteur limitant, et permet même d'atteindre un rendement photosynthétique saturé en condition de laboratoire (MADSEN & SUNDERGARD, 1983).

Cependant, cette fonction d'épuration de l'eau n'est que partielle puisqu'elle est effective uniquement lors de la phase végétative des végétaux. Lors de la senescence des macrophytes, d'importants volumes de biomasse sont relargués dans le système, voués à enrichir de nouveau de milieu en éléments organiques et nutriments.

4. Sur la biodiversité

La prolifération des macrophytes est un phénomène qui engendre des effets, aussi bien positifs que négatifs, sur le compartiment biotique pouvant amener la diversité spécifique à être améliorée ou, au contraire, diminuée :

a. Rétention des sédiments fins

- + Effet de stockage des sédiments (cf. II.2.b.). Le mélange des sédiments fins à des débris de toutes sortes est favorable à l'implantation de nouvelles espèces, initialement incapables de s'installer dans des conditions normales d'écoulement et de substrat. Cette observation a notamment été faite dans l'Adour, où des pieds de *Lagarosiphon major* se sont implantés au niveau de la zone calme située immédiatement à l'aval de pieds de Renoncules (DELATTRE & REBILLARD, 1996). Cette interaction n'est pas unidirectionnelle puisque les Lagarosiphons

contribuent à la stabilisation des sédiments et limitent donc les risques d'arrachage de l'herbier.

- + Cette sédimentation accrue permet un accès direct aux nutriments essentiels à la croissance des macrophytes, et notamment au phosphore, permettant une production primaire améliorée et donc une absorption (temporaire) des nutriments par les macrophytes.
- Cependant, le dépôt de ces particules fines engendre un colmatage localisé des sédiments plus grossiers, néfaste pour les espèces piscicoles lithophiles (PELTRE et *al.*, 2002).
- La production primaire étant accrue, des quantités importantes de biomasse sont formées, et tous les effets positifs sont effectifs durant la saison végétative, or lors de la senescence, toute cette biomasse est relâchée dans le milieu et induit un apport brutal et massif de matière organique.
- La disponibilité des nutriments pour les macrophytes favorise l'implantation des espèces nitrophiles (BARKO et *al.*, 1991). Le premier constat est donc une augmentation de la richesse spécifique. Cependant, ce résultat est le plus souvent de courte durée, puisque au fur et à mesure que les espèces s'établissent, les espèces compétitives dominent la communauté (CARPENTER & LODGE, 1986). ANGELSTEIN et *al.* (2009) ont remarqué qu'avec une fertilité accrue des sédiments, la capacité concurrentielle de *Elodea nuttallii* et *Myriophyllum spicatum* est significativement plus élevée.

b. Modification des paramètres hydrauliques

- + Les herbiers de macrophytes ont des effets significatifs sur les paramètres hydrauliques (cf. II.2.a.) et notamment sur les vitesses d'écoulements et la turbulence. Agissant à la façon d'une barrière semi-perméable, l'implantation des herbiers, plus ou moins dispersée dans le cours d'eau, permet de diversifier les vitesses d'écoulement et l'hétérogénéité des habitats en créant une large gamme des vitesses d'écoulement. Leur

implantation peut fournir localement des secteurs à faible vitesse, zone de repos privilégiée pour de nombreuses espèces (CHAMPION & TANNER, 2000).

- Aussi, les herbiers peuvent constituer un risque de banalisation de l'habitat important, notamment lorsque l'ombrage recouvre des surfaces importantes. (PELTRE et *al.*, 2002).

c. Les herbiers constituent un habitat

- + L'appareil végétatif des macrophytes forme un support étendu et dispersé, qui va significativement influencer, de façon positive, le compartiment bactérien, le périphyton, mais aussi les invertébrés benthiques et les poissons. En effet, les organismes périphytiques profitent de l'interface étendue que représente les macrophytes, mais aussi des rejets métaboliques des macrophytes (cf. II.2.c.) qui fournissent des molécules organiques diverses tout au long de leur vie (PELTRE et *al.*, 2002 ; GAEVSKAYA, 1969).
- Cependant, en vivant au contact direct des macrophytes, ces organismes sont soumis au « microclimat » qu'impose ces structures végétales, et notamment concernant les conditions physico-chimiques pouvant être rudes pour les organismes, comme par exemple avec les amplitudes journalières importantes des concentrations en oxygène (cf. II.2.c.). (GAEVSKAYA, 1969).
- Plus spécifiquement, les proliférations de macrophytes ont un impact sur les populations piscicoles. HAURY & BAGLINIÈRE (1996) ont démontrés le rôle structurant des macrophytes et de leurs cycles saisonniers sur l'habitat pisciaire. Les auteurs ont co-analysés la distribution spatiale de la végétation et la microrépartition des poissons, permettant de conclure que les salmonidés étaient particulièrement peu abondants dans les herbiers d'un radier, alors que ce biotope leur est réputé favorable, et après décapage

(arrachage des renoncules) les inventaires ont montrés un doublement des densités de jeunes saumons dans les milieux dégagés.

5. Sur les usages

Les usages développés par les Hommes autour des cours d'eau sont nombreux et ancrés dans l'histoire puisque depuis le Moyen-Age les cinq plus grandes cités françaises (Paris, Lyon, Nantes, Toulouse ou Strasbourg) se sont développées autour des fleuves. Ces populations se sont enrichies grâce aux activités et usages liés au cours d'eau, mais elles en ont également subies les aléas (notamment les inondations). Aujourd'hui encore, de nombreux usages et activités dépendent des cours d'eau et les phénomènes de prolifération de macrophytes engendrent des nuisances sur ces usages.

RAMADE (1993) définit une nuisance comme étant « toute dégradation de l'environnement ayant pour conséquence d'induire une gêne pour les personnes qui la subissent ». L'auteur précise également que cette nuisance ne présente pas systématiquement « d'effet néfaste sur la santé humaine et (ou) au plan économique. Toutefois elles sont perçues, à juste titre, par ceux qui y sont exposés, comme une modification défavorable de l'environnement ». DUTARTRE (2006) souligne l'appréciation subjective qui est faite d'une gêne vis-à-vis d'un usage, gêne créée par l'évolution d'un ou plusieurs paramètres du milieu. Dans le cas des macrophytes, lorsqu'une prolifération occupe une surface importante ou à des endroits où sont exercés des usages, dès lors qu'elle gêne ces usages, cette prolifération devient une nuisance.

a. Colmatage des prises d'eau

La prolifération d'herbiers de macrophytes peut être à l'origine de graves problèmes, et notamment au travers l'obstruction de prises d'eau d'installations industrielles. Cette nuisance n'est pas directement liée à l'occupation de l'espace par les herbiers de macrophytes, mais au lien entre les régimes hydrologiques et le maintien des herbiers.

En effet, la fin de la saison végétative coïncide avec les périodes à forte probabilité de crues. Ces dernières, pour les plus importantes, déstabilisent les sédiments, et exercent des contraintes mécaniques sur les herbiers, entraînant leur mobilisation plus ou moins soudaine. Par exemple, dans le cadre d'un suivi des développements de macrophytes sur la Charente (DUTARTRE, 1994), l'année 1992, sans crue hivernale notable, a été suivie de deux années à fortes crues et la colonisation végétale du cours d'eau a fortement diminuée : sur une même station d'échantillonnage, 70 % des points contacts sont positifs (présence de macrophytes) en 1992, et ces pourcentages ont régressés jusqu'à 35 % en 1993 et moins de 20 % en 1994. Cette même étude montre également que l'impact des crues de printemps, généralement moins fortes que celles de l'hiver, ont également un impact fort sur la mobilisation des jeunes herbiers en début de croissance.

Les crues sont donc à l'origine de l'arrachage des grands herbiers de macrophytes et peuvent avoir des conséquences notables sur certaines des installations humaines. Hormis des dépôts pouvant s'opérer au niveau de seuils, barrages ou écluses, venant alors localement gêner les écoulements, des phénomènes de colmatages des filtres des prises d'eau (Figure 7) peuvent se produire, avec des conséquences potentiellement graves.

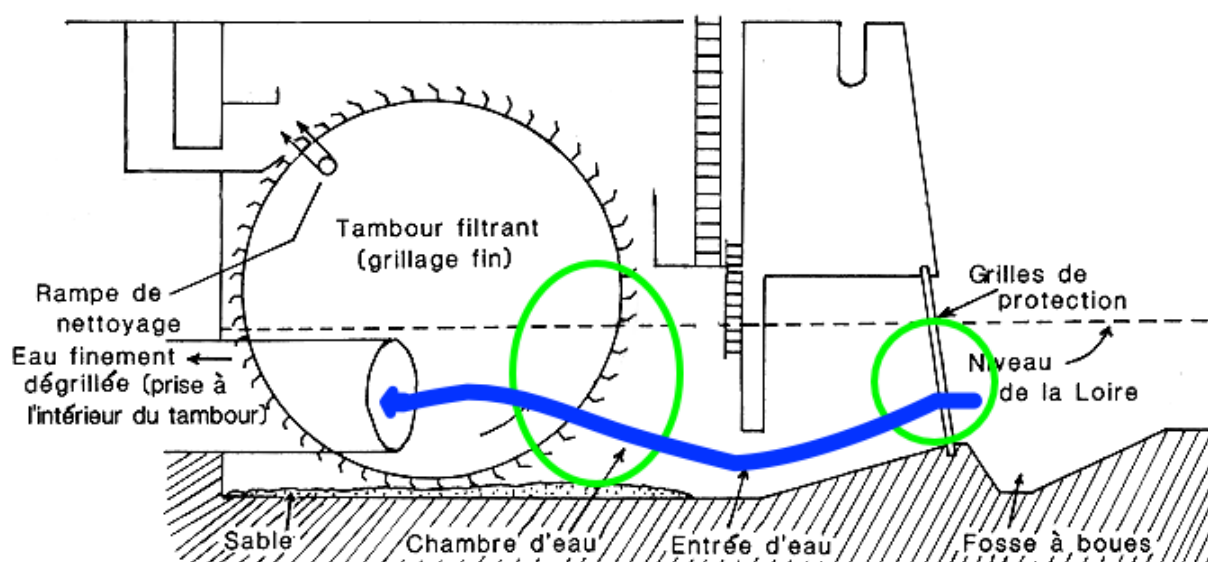


Figure 7 : Schématisation d'un système de filtrage de l'eau au niveau d'une prise d'eau de CNPE . Le sens d'écoulement normal de l'eau est indiqué en bleu, et les zones préférentielles de colmatage en vert (modifié d'après CUI NAT et al., 1981).

L'accumulation de déchets macrophytiques plus ou moins grossiers entraîne des phénomènes de colmatages au niveau des deux zones de dégrillage du système. Le premier niveau de dégrillage (Figure 7, cercle vert de droite) est équipé d'un dispositif de récupération et de stockage des déchets les plus grossiers. En revanche, au niveau du système de dégrillage fin, le tambour filtrant est susceptible de se colmater aisément lorsque de grande quantité de fragments de macrophytes sont transportés par l'eau. Ce colmatage est dangereusement amplifié car dans de nombreux cours d'eau, d'autres organismes benthiques colonisent le tambour, diminuant significativement sa perméabilité (KHALANSKI, 1997). De tels événements peuvent entraîner l'arrêt temporaire d'unités de production et la perte totale de source froide dans les systèmes de refroidissement. Ce scénario a déjà été observé à plusieurs reprises en France.

En décembre 2009, sur le site de Cruas sur le Rhône, 50 m³ de matières végétales (majoritairement constituée de l'Élodée de Nuttall ; *Elodea nuttallii*) se sont engouffrés dans la prise d'eau de la CNPE (Figure 8) et ont entraînés le colmatage de deux des quatre systèmes de pompage des circuits de refroidissement (CARREL, 2009 ; IRSN, 2009).



Figure 8 : Photographie de la masse de macrophytes évacuée des systèmes de dégrillages de la prise d'eau (IRSN, 2009).

Deux des quatre réacteurs ont été maintenus dix heures sans source froide renouvelée. Cet événement, rapidement identifié a entraîné la mise en place de la procédure de substitution de refroidissement et le classement de l'incident en niveau 2 (échelle comportant huit niveaux de 0 à 7 : les incidents classés des niveaux 1 à 3 et les accidents des niveaux 4 à 7). Là aussi, une modification importante des conditions hydrologique est à l'origine de ce charriage massif d'Elodées.

Ces risques entraînent l'obligation pour l'exploitant de mettre en place des protocoles de suivis interannuels afin de quantifier les biomasses de macrophytes présents en amont des centrales nucléaires. Cela permet également d'évaluer la variation temporelle des herbiers en terme de composition et de densité. GUY et *al.* (2014) ont étudiés la biomasse que représentent les herbiers de macrophytes au niveau de cinq stations situées en amont de la CNPE (Centrale Nucléaire de Production d'Electricité) de Golfech. En juillet 2014, ils estiment une biomasse moyenne sur cinq station échantillonnées de 1,44 tonne / hectare, et 2,58 tonne / hectare en septembre. On obtient des valeurs assez homogènes de biomasse entre les stations, dû à la présence d'herbiers importants occupant les annexes de la Garonne et du Tarn. Cette étude a également mis en évidence la dynamique de croissance de ces herbiers face aux crues : les auteurs ont observés des valeurs bien plus importantes en 2012, avant une crue significative au printemps 2013.

Afin d'améliorer les connaissances sur herbiers présents en amont des CNPE, et de quantifier les biomasses de macrophytes présentent, DURAND et *al.* (2016) se sont penchés sur des techniques de télédétection des herbiers de macrophytes par drone ou ULM.

Le charriage de macrophytes par les cours d'eau entraine également des dommages au niveau des centrales de production d'hydroélectricité. En effet, certaines de ces centrales sont équipées de système de dégrillages qui ne sont pas adaptés et dimensionnés pour résister aux contraintes exercées par plusieurs dizaines de mètres cubes de macrophytes déposés sur les grilles (LIABUNYA, 2007 ; RORSLETT, 1988). Ces accumulations entraînent la fragilisation des systèmes de dégrillage, voir leur rupture (Figure 9).



Figure 9 : Illustration des dégâts occasionnés par l'accumulation de macrophytes au niveau des structures de rétention des déchets et fragments végétaux : à gauche, le niveau de rétention des fragments grossiers qui est fragilisé ; à droite, celui pour les fragments plus fins, qui a cédé (LIABUNYA, 2007).

b. Dévalorisation des cours d'eau

Les herbiers de macrophytes sont régulièrement perçus comme inesthétiques par le grand public pour plusieurs raisons. Dans un premier temps, les herbiers peuvent occuper des surfaces très importantes sur la surface mouillée du chenal, voir sa totalité (en particulier au niveau des zones lenticques). Le cours d'eau peut alors disparaître en intégralité sous un matelas de macrophytes, révoquant les attraits esthétiques naturels du cours d'eau (reflets, eau translucide...) attendu par le grand public (VIRONNEAU, 2012).



Figure 10 : Herbier de macrophytes retenant des déchets flottants sur l'Indre (ROCHE-BAYARD, 2015).

Au-delà des aspects purement esthétiques, d'autres effets peuvent venir amplifier cette dévalorisation du cours d'eau, et notamment en raison de « l'effet filet » qu'assure ces

herbiers. En effet, de nombreux déchets flottants, véhiculés par le cours d'eau ou jetés dans le cours d'eau (notamment dans agglomérations) se retrouvent facilement stockés dans ces herbiers (Figure 10) (REBILLARD et al., 2003 ; ROCHE-BAYARD, 2015).

Enfin, si les herbiers de macrophytes sont toujours implantés au début de l'automne, leur décomposition peut engendrer des nuisances olfactives et visuelles liées à la décomposition de ces masses de matières organiques (DUFAY et al., 2001 ; REBILLARD et al., 2003).

c. Perturbation des activités de loisirs

Des perturbations sont régulièrement rencontrées concernant les activités qui s'organisent autour du cours d'eau. Les herbiers denses de macrophytes forment des barrières physiques amenées à contraindre les déplacements des bateaux à moteurs thermiques (blocage des hélices) ou à rendre difficile l'évolution sur le cours d'eau en canoë ou pédalo (Figure 11) (BRUNEAU, 2002).



Figure 11 : Illustration de la réduction de la largeur du lit mineur "exploitable" en canoë (photo : Kévin COLIN, 2015).

Ces herbiers en viennent à nuire à l'activité touristique de certaines communes (REBILLARD et al., 2003) et obligent les autorités locales à mettre en place des plans de

gestion pluri-annuels afin de contenir ou supprimer ces proliférations (DUTARTRE, 2002). Enfin, l'usage piscicole des cours d'eau peut être localement fortement perturbé. En effet, certains herbiers peuvent recouvrir de très grandes surfaces, pouvant atteindre 6 hectares, soit l'équivalent de plus de huit terrains de football (REBILLARD et *al.*, 2003), rendant la pratique de la pêche quasi impossible.

Conclusion

Les phénomènes de proliférations des macrophytes apparaissent comme des processus plus ou moins localisés, pouvant occuper de grandes surfaces et engendrer des effets variés, globalement plus néfastes que positifs.

Ces phénomènes s'exercent sous l'effet de nombreux facteurs, dont la compréhension et l'interprétation n'apparaît pas toujours évidente. Cependant, le principal levier d'action face à ces proliférations semble être d'ordre trophique : en réduisant le niveau trophique des cours d'eau, via le retour de concentrations « normales » en phosphore et en azote.

Bibliographie

ALLEN, H.L., 1971. Primary productivity, chemo-organotrophy and nutritional interactions of epiphytic algae and bacteria on macrophytes in a lake. *Ecol. Monogr.*, 41 : p.97-127.

AMOROS, C., & PETTS, G.E., 1993. Hydrosystèmes fluviaux. Collection d'Ecologie. Paris, Masson. 300 p.

ANGELSTEIN, S., WOLFRAM, C., RAHN, K., KIWEL, U., FRIMEL, S., MERBACH, I., & SCHUBERT, H., 2009. The influence of different sediment nutrient contents on growth and competition of *Elodea nuttalli* and *Myriophyllum spicatum* in nutrient-poor waters. *Fundam. Appl. Limnol. Arch. Hydrobiol.* 175 (1), p.49-57.

AREA EAU-ENVIRONNEMENT, 1993. Etude des développements végétaux sur la Bouzaise (Côte d'Or). Rapport d'étude pour le compte de l'Agence de l'Eau Rhône- Méditerranée-Corse, Lyon, 98 p.

BARKO, J.W., GUNNISON, D., CARPENTER, S.R., 1991. Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics. *Aquatic Botany* 41 : p.41-65.

BENGEN, D., LIM, P. & BELAUD, A., 1992. Qualité des eaux de trois bras morts de la Garonne : variabilité spatio- temporelle. *Rev. Sci. Eau*, 5, p.131-156.

BRUNEAU, P., 2002. Dynamique des peuplements de végétaux aquatiques de grands cours d'eau et perception par des acteurs institutionnels. Application à la Garonne et à la Dordogne, mémoire de DEA, MNHN-Cemagref. 148 p.

CARPENTER, S. R., & LODGE, D. M., 1986. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes. *Aquatic botany*, 26, 341-370.

CARRE, G.M., CHAMBERS, P.A., 1998. Macrophyte growth and sediment phosphorus and nitrogen in a Canadian prairie river. *Freshwater Biology* 39 : p.525-536.

CARREL, G., 2009. CNPE de Cruas-Meysses Ardèche - Incident consécutif au colmatage de la prise d'eau par des macrophytes. Cemagref. 10 p.

CHAMPION, P. D., & TANNER, C. C., 2000. Seasonality of macrophytes and interaction with flow in a New Zealand lowland stream. *Hydrobiologia*, 441(1). p.1-12.

CORENBLIT, D., TABACCHI, E., STEIGER, J., & GURNELL, A. M., 2007. Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors : a review of complementary approaches. *Earth-Science Reviews*, 84(1), p.56-86.

CUINAT, R., BOMASSI, P., & BOUSQUET, B., 1981. Observations sur les juvéniles (smolts) de saumon atlantique bloqués dans la prise d'eau d'une centrale nucléaire sur la Loire. *Technical Consultation on Allocation of Fishery Resources*. Vichy (France).

DAWSON, F.H., CASTELLANO, E., & LADLE, M., 1978. The concept of species succession in relation to river vegetation and management. *Verhandlungen der internationalen Vereinigung für Limnologie* 20 : p.1429-1434.

DAWSON, F.H., & KERN-HANSEN, U., 1979. The effect of natural and artificial shade on the macrophytes of lowland streams and the use of shade as a management technique. *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.*, 64. p.437-455.

DIRECTION DE L'EAU, 2005. Typologie nationale relative aux eaux de surface (cours d'eau, plan d'eau, eaux de transition et eaux côtières). Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Circulaire DCE, Paris. 18 p.

DUFAY, O., GARNIER, J. & BILLEN, G., 2001. Les macrophytes dans les petits cours d'eau (ordres 1 à 5) du bassin de la Seine. Rapport FUL Arlon, Belgique & UMR Sisyphe, CNRS Paris. 21p.

DURAND, A., STUDER, M., MARCHAND, A. L., MAURIS, F., & RICHARD, N., 2016. Suivi environnemental des herbiers de rivière par imagerie acquise par ULM et drone : retour d'expérience et potentiel. *La Houille Blanche*. p.18-23.

DUTARTRE, A., 1994. Groupe Plantes Aquatiques. Bilan 1988-1994. Cemagref, ANPP. Rapport. 99 p.

DUTARTRE, A., 2002. Panorama des modes de gestion des plantes aquatiques : nuisances, usages, techniques et risques induits. *Ingénieries-EAT*, n°30. 29p.

DUTARTRE, A., 2006. Gestion des plantes aquatiques envahissantes : exemple des Jussies. Conférence-débat sur les espèces envahissantes, Société Nationale de la Protection de la Nature. Paris, 25 novembre 2006.

FAAFENG, B.A., & ROSETH, R., 1993. Retention of nitrogen in small streams artificially polluted with nitrate. *Hydrobiologia* 251 : p.113-122.

GAEVSKAYA, N.S., 1969. The role of higher aquatic plants in the nutrition of animals of freshwater basins. National Lending Library of Science and Technology, Yorkshire, England, 3 vols., 629 p.

GHISALBERTI, M. & NEPF, H. 2009. Shallow flows over a permeable medium : the hydrodynamics of submerged aquatic canopies. *Transport in Porous Media* 78 : p.385-402.

GOSSE, P., 1989. Influence des végétaux fixés sur la qualité de l'eau du Vair et du Petit Vair en aval de Vittel. Note technique (HE 31/89 n°6) EDF. DER, Chatou. 82 p.

GRASMÜCK, N., HAURY, J., LEGLIZE, L., & MULLER, S., 1993. Analyse de la végétation aquatique fixée des cours d'eau lorrains en relation avec les paramètres d'environnement. In *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, Vol. 29, n° 3. p. 223-237.

GREEN, J. C., 2005. Modelling flow resistance in vegetated streams : review and development of new theory. *Hydrological processes*, 19(6). p.1245-1259.

GREEN, J.C., 2006. Effect of macrophyte spatial variability on channel resistance. *Advances in Water Resources* 29 : p.426-438.

GROUPEMENT D'INTERÊT SCIENTIFIQUE MACROPHYTES, 1997. Biologie et écologie des espèces végétales aquatiques proliférant en France. Synthèse bibliographique. Rapport réalisé à la demande de l'Inter-Agence de l'eau. 199 p.

GURNELL, A.M., VAN-OOSTERHOUT, M.P., DE-VLIEGER, B. & GOODSON, J.M., 2006. Reach- scale interactions between aquatic plants and physical habitat : River Frome, Dorset. *River Research and Applications* 22 : p.667-680.

GUY, J., ARCAHMBEAU, R. & ELGER, A., 2014. Cartographie et mesure de biomasse des herbiers de macrophytes aquatiques à l'amont du CNPE de Golfech – Année 2014. Rapport d'étude. 23p.

HAURY, J., 1992. Les types éco-morphologiques des macrophytes. Intérêt pour la description et la compréhension de la végétation des cours d'eau. 15ème conférence COLUMA, Versailles, 02-04 décembre 1992. p.1039-1047.

HAURY, J., BAGLINIÈRE, J.L., 1996. Les macrophytes, facteur structurant de l'habitat piscicole en rivière à Salmonidae. Etude de microrépartition sur un secteur végétalisé du Scorff (Bretagne-Sud). *Cybium*, 20, 3, suppl. p.107-122.

HEPPELL, C.M., WHARTON, G., COTTON, J.C., BASS, J., & ROBERTS, S., 2009. Sediment storage in the shallow hyporheic of lowland vegetated river reaches. *Hydrological Processes* 23 : p.2239-2251.

HOLMES, N. T. H., & WHITTON, B. A., 1977. The macrophytic vegetation of the River Tees in 1975 : observed and predicted changes. *Freshwater Biology*, 7(1). p.43-60.

HOLMES, N.T.H., BOON, P.J., & ROWELL, T.A., 1998. A revised classification system for British rivers based on their aquatic plant communities. *Aquatic Conservation : Marine and Freshwater Ecosystems*, 8(4). p.555-578.

HUET, M., 1949. Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. *Revue Suisse d'Hydrobiologie*, 11. p.332-35.

I.R.S.N. (Institut de la Radioprotection et de la Sûreté Nucléaire), 2009. Le point de vue de l'IRSN sur la sûreté et la radioprotection du parc électronucléaire français en 2009. Rapport de la Direction de la Sûreté des Réacteurs n°383. 72p.

JONES, J.I., COLLINS, A.L., NADEN, P.S., SEAR, D.A., 2011. The relationship between fine sediment and Macrophytes in rivers. *River research and applications*. p.1006-1018.

JUGET J., & ROSTAN J.C., 1973. Influence des herbiers à *Trapa natans* sur la dynamique d'un étang en période estivale. *Ann. Limnol.*, 9. p.11-23.

KHALANSKI, M., 1997. Conséquences industrielles et écologiques de l'introduction de nouvelles espèces dans les hydrosystèmes continentaux : la moule zébrée et autres espèces invasives. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (344-345). p.385-404.

LIABUNYA, W. W., 2007. Malawi aquatic weeds management at hydro power plants. In *International Conference on Small Hydropower-Hydro Sri Lanka*, Vol. 22. 24 p.

LIVINGSTONE, D.M., 1991. The diel oxygen cycle in three subalpine Swiss streams. *Arch. Hydrobiol.*, 120, p.457-479.

LUHAR, M., ROMINGER, J., NEPF, H., 2008. Interaction between flow, transport and vegetation spatial structure. *Environmental Fluid Mechanics* 8 : p.423- 439.

LUTHER, H., 1949. Vorschlag zu einer ökologischen Grundeinteilung der Hydrophyten. *Acta Botanica Fennica*, (44). p.1-15.

MALAVOI, J. R., & SOUCHON, Y., 1996. Dynamique fluviale et dynamique écologique. *La Houille Blanche*, (6-7). p.98-107.

MADSEN, T.V., & WARNCKE, E., 1983. Velocities of currents around and within submerged aquatic vegetation. *Archiv für Hydrobiologie* 97 : p.389- 394.

MARS, M., M. KURUVILLA AND H. GOEN, 1999. The role of submergent macrophyte *triglochin huegelii* in domestic greywater treatment, *Ecol. Eng.*, 12, p.57-66.

MARTINOVA, M.V., 1993. Nitrogen and phosphor compounds in bottom sediments - mechanisms of accumulation, transformation and release. *Hydrobiologia* 252 : p.1-22.

NOISETTE, F., 2013. Impacts de l'acidification des océans sur les organismes benthiques calcifiants des milieux côtiers tempérés (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).

O'CONNOR, D.J. & DI TORO, D.M., 1970. Photosynthesis and oxygen balance in streams. J. Sanit. Eng. Div. ASCE, 96, p.547-571.

PARENT, S., 1991. Dictionnaire des sciences de l'environnement. Terminologie bilingue français-anglais. Hatier-Rageot, Paris. 748 p.

PELTRE, M. C., DUTATRE, A., BARBE, J., HAURY, J., MULLER, S., & OLLIVIER, M., 2002. Les proliférations végétales aquatiques en France : caractères biologiques et écologiques des principales espèces et milieux propices. ii. impact sur les écosystèmes et intérêt pour le contrôle des proliférations. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (365-366), p.259-280.

RAMADE F., 1993. Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. Ediscience, Paris. 822 p.

REBILLARD, J., ROIGNANT, F., FERRONI, J., & DUTARTRE, A., 2003. Travaux expérimentaux sur l'herbier de renoncules aquatiques d'Entraygues-sur-Truyère. Adour Garonne, (86). 6p.

ROBERT P., 1971. Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française. Société du Nouveau Littré. Le Robert. Ed., Paris. 6 volumes.

ROCHE-BAYARD, X., 2015. La rivière a besoin d'un faucardage. La Nouvelle République [en ligne] Disponible sur : <http://www.lanouvellerepublique.fr/Indre-et-Loire/Communes/Loches/n/Contenus/Articles/2014/09/15/La-riviere-a-besoin-d-un-faucardage-2045724> [Consulté le 18 novembre 2016]

RORSLETT, B., 1988. Aquatic weed problems in a hydroelectric river : the R. Otra, Norway. *Regulated Rivers : Research & Management*, 2(1). p.25-37.

ROUSSEL, J. M., BARDONNET, A., HAURY, J., BAGLINIERE, J. L., & PREVOST, E., 1998. Végétation aquatique et peuplement pisciaire : approche expérimentale de l'enlèvement des macrophytes dans les radiers d'un cours d'eau breton. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (350-351), p.693-709.

SAND-JENSEN, K. & MEBUS, J.R., 1996. Fine-scale patterns of water velocity within macrophyte patches in streams. *Oikos* 76 : p.169-180.

SAND-JENSEN, K., & PEDERSEN, O., 1999. Velocity gradients and turbulence around macrophyte stands in streams. *Freshwater Biology* 42 : p.315-328.

SANDERS, I.A., HEPPELL, C.M., COTTON, J.A., WHARTON, G., HILDREW, A.G., FLOWERS, E.J., & TRIMMER, M., 2007. Emission of methane from chalk streams has potential implications for agricultural practices. *Freshwater Biology* 52 : p.1176- 1186.

SCHLEICHER, J., 2007. Guide de la mesure de l'ammoniac dans l'eau. Jumo ed. 24p.

SERVICE RÉGIONAL DE L'AMÉNAGEMENT DES EAUX (SRAE) FRANCHE-COMTÉ, 1990. Proliférations algales. Loue : été 1989. Rapport d'étude pour le compte de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Lyon. 44 p.

SMITH, C.S., 1978. Phosphorus uptake by roots and shoots of *Myriophyllum spicatum* L. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, 113 p.

STRAHLER, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38. p.913-920.

STUTTER, M.I., LANGAN, S.J., DEMARS, B., 2007. River sediments provide a link between catchment pressures and ecological status in a mixed land use Scottish River system. *Water Research* 41 : p.2803-2815.

SURUGUE, N., 1997. Dynamique de l'écoulement en rivière et développement végétal. Mém. 3^e année, ENGEES, Strasbourg. 101 p.

THOMAZ, S.M., CHAMBERS, P.A., PIERINI, S.A., & PEREIRA, G., 2007. Effects of phosphorus and nitrogen amendments on the growth of *Egeria najas*. *Aquatic Botany* 86 : p.191-196.

TRIMMER, M., SANDERS, I.A., HEPPELL, C.M., 2009. Carbon and nitrogen cycling in a vegetated lowland chalk river impacted by sediment. *Hydrological Processes* 23 : p.2225-2238.

VAN DER BORGHT, P., SKA, B., SCHMITZ ; A., & WOLLAST, R., 1982. Eutrophisation de la rivière Semois : le développement de *Ranunculus* et ses conséquences sur l'écosystème aquatique. In : SYMOENS J.J., HOOPER S.S., COMPÈRE P. (Eds.). *Studies on aquatic vascular plants*, p.340-345, Royal botanical society of Belgium, Brussels.

VIRONNEAU, F., 2012. Algues vertes : c'est moche mais sans danger. La Dépêche du midi [en ligne] Disponible sur : <http://www.ladepeche.fr/article/2012/08/15/1419140-algues-vertes-c-est-moche-mais-sans-danger.html> [Consulté le 17 novembre 2016].

WESTLAKE, D.F., 1966. The light climate for plants in rivers. In : BAINBRIDGE R. and EVANS G.G. (Eds.), *Light as an ecological factor. Blackwell Scientific Publications*. p.99-119.

WETZEL, R.G., 1969. Factors influencing photosynthesis and excretion of dissolved organic matter by aquatic macrophytes in hard-water lakes. *Verh. Int. Verein. Limnol.*, 17 : p.72-85.

WHARTON, G., COTTON, J.A., WOTTON, R.S., BASS, J., HEPPELL, C., TRIMMER, M., SANDERS, I., & WARREN, L., 2006. Macrophytes and suspension-feeding invertebrates modify flows and fine sediments in the Frome and Piddle catchments, Dorset (UK). *Journal of Hydrology* 330 : p.171-184.

WIEGLEB, G., 1988. Analysis of flora and vegetation in rivers: concepts and applications. In : *Vegetation of inland waters*. Symoens J.J. Ed. Dordrecht, Kluwer. p.311-340.

WINDHAM, L., J.S. WEIS & P. WEIS, 2003. Uptake and distribution of metals in two dominant salt marsh macrophytes, *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis*, Est., *Coast. and Shelf Sci.*, 56, p.63-72.

CITERES

UMR 6173
*Cités, Territoires,
Environnement et
Sociétés*

Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement,
Paysage,
Environnement



35 allée Ferdinand de Lesseps
BP 30553
37205 TOURS cedex 3

Directeur de recherche :
Richard Nina

Colin Kévin
Projet de Fin d'Etudes
DA5
2016-2017

Identification des impacts des phénomènes de prolifération macrophytique en grandes rivières, sur les compartiments physique et chimique, la biodiversité, et sur les usages.

Résumé :

Les macrophytes aquatiques d'eau douce forment au sein des hydrosystèmes continentaux un compartiment fonctionnel de premier ordre aux fonctions variées. Ce compartiment assure des fonctions majeures dans les cycles biogéochimiques et la productivité du milieu, parce qu'il constitue une zone d'interface clé.

Ce rapport résume les différents impacts des phénomènes de proliférations de macrophytes sur les compartiments physique, chimique du milieu, sur la biodiversité et sur les usages concernés par ces événements. Ces impacts sont variés, positifs et négatifs et concernent, à des degrés différents toutes les composantes du milieu environnant.

Mots Clés : macrophytes, prolifération, interaction, cours d'eau