

Approche multicritère pour la sélection de plantes aquatiques en vue d'une exploitation rationnelle

Multicriteria approach for the selection and a rational use of aquatic plants for wastewater treatment

Ruben Bodo, Robert Hausler et Abdelkrim Azzouz

Volume 19, numéro 3, 2006

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/013537ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/013537ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Bodo, R., Hausler, R. & Azzouz, A. (2006). Approche multicritère pour la sélection de plantes aquatiques en vue d'une exploitation rationnelle. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 19(3), 181-197. <https://doi.org/10.7202/013537ar>

Résumé de l'article

L'invasion incontrôlée des plans d'eau par les plantes aquatiques est une problématique d'actualité, plus particulièrement dans les pays tropicaux, à cause du phénomène d'eutrophisation. Parmi les solutions proposées, une exploitation rationnelle de certaines plantes envahissantes comme source de biomasse valorisable, et comme agents de dépollution, est envisagée. Dans le cadre de cette étude, un accent particulier a été mis sur une sélection adéquate de plantes aquatiques visant un développement durable, se basant sur la capacité de cette plante à s'adapter à son milieu de culture avec un impact environnemental pratiquement nul. Pour cela, il est nécessaire que la plante sélectionnée puisse présenter des propriétés dépolluantes pouvant ramener l'écosystème à son état naturel d'origine et que le taux de croissance de cette plante soit contrôlé par une exploitation optimisée de la biomasse récoltée. La problématique envisagée s'est limitée à un nombre restreint de plantes aquatiques, fréquemment rencontrées dans les milieux eutrophisés, à savoir la jacinthe d'eau, les lentilles d'eau, la laitue d'eau, le papyrus et le chou de marais. Un choix et une hiérarchisation préalables des principaux critères d'évaluation ont permis, sur la base d'une analyse de satisfaction rigoureuse, d'opter pour la jacinthe d'eau, comme étant la meilleure alternative, présentant un grand pouvoir de fixation d'éléments polluants et un potentiel élevé en protéines et agents antioxydants, dans un contexte donné. Une exploitation judicieuse de cette plante dans un plan d'eau continuellement pollué ne posera plus de problèmes de rentabilité, étant donné que la productivité sera assurée par la récolte d'un excédent de jacinthes, deux ou trois fois par mois. Ceci permettra de mieux maîtriser le taux de recouvrement du plan d'eau par la plante aquatique, évitant ainsi une eutrophisation de celui-ci. La méthodologie adoptée peut être généralisée à d'autres plantes aquatiques et d'autres contextes.

APPROCHE MULTICRITÈRE POUR LA SÉLECTION DE PLANTES AQUATIQUES EN VUE D'UNE EXPLOITATION RATIONNELLE

Multicriteria approach for the selection and a rational use of aquatic plants for wastewater treatment

Ruben Bodo¹, Robert Hausler^{2*}, Abdelkrim Azouzi³

¹Institut des sciences de l'environnement (ISE), Université du Québec à Montréal (UQAM), C.P. 8888, Centre-ville, Montréal (Québec) H3C 3P8 Canada.

²STEPPE-ETS, Département de construction, École de Technologie Supérieure, 1100, rue Notre Dame Ouest, Montréal (Québec) H3C 1K3 Canada.

³Laboratory of Catalysis and Microporous Materials, Bacau University, RO-5500, Romania (professeur invité à la STEPPE-ETS)

Reçu le 30 novembre 2004, accepté le 28 septembre 2005

RÉSUMÉ

L'envahissement incontrôlé des plans d'eau par les plantes aquatiques est une problématique d'actualité, plus particulièrement dans les pays tropicaux, à cause du phénomène d'eutrophisation. Parmi les solutions proposées, une exploitation rationnelle de certaines plantes envahissantes comme source de biomasse valorisable, et comme agents de dépollution, est envisagée. Dans le cadre de cette étude, un accent particulier a été mis sur une sélection adéquate de plantes aquatiques visant un développement durable, se basant sur la capacité de cette plante à s'adapter à son milieu de culture avec un impact environnemental pratiquement nul. Pour cela, il est nécessaire que la plante sélectionnée puisse présenter des propriétés dépolluantes pouvant ramener l'écosystème à son état naturel d'origine et que le taux de croissance de cette plante soit contrôlé par une exploitation optimisée de la biomasse récoltée. La problématique envisagée s'est limitée à un nombre restreint de plantes aquatiques, fréquemment rencontrées dans les milieux eutrophisés, à

savoir la jacinthe d'eau, les lentilles d'eau, la laitue d'eau, le papyrus et le chou de marais. Un choix et une hiérarchisation préalables des principaux critères d'évaluation ont permis, sur la base d'une analyse de satisfaction rigoureuse, d'opter pour la jacinthe d'eau, comme étant la meilleure alternative, présentant un grand pouvoir de fixation d'éléments polluants et un potentiel élevé en protéines et agents antioxydants, dans un contexte donné. Une exploitation judicieuse de cette plante dans un plan d'eau continuellement pollué ne posera plus de problèmes de rentabilité, étant donné que la productivité sera assurée par la récolte d'un excédent de jacinthes, deux ou trois fois par mois. Ceci permettra de mieux maîtriser le taux de recouvrement du plan d'eau par la plante aquatique, évitant ainsi une eutrophisation de celui-ci. La méthodologie adoptée peut être généralisée à d'autres plantes aquatiques et d'autres contextes.

Mots clés : *jacinthe d'eau, plantes aquatiques, traitement des eaux usées, biomasse, analyse de satisfaction, aide multicritère.*

*Auteur pour correspondance :
Tél. : (514) 396-8499
Fax : (514) 396-8584
Courriel : robert.hausler@etsmtl.ca

ABSTRACT

Uncontrolled invasion of water bodies by aquatic plants, due to eutrophication, is a major environmental concern, especially in tropical countries. Most aquatic plants exhibit water-cleansing properties, but only some of them can be exploited as highly valuable sources of proteins and antioxidizing agents. In this regard, a rational exploitation of judiciously selected aquatic plants can provide low-cost technologies that combine increased biomass productivities and effective depolluting capacity, in a sustainable development context. In the present paper, we have considered some aquatic plants that usually grow in tropical countries, namely water hyacinth, duckweed, water lettuce, common papyrus and water spinach. To achieve a rigorous methodology that allows the rational exploitation of aquatic plants, attempts were made through a multicriteria analysis method to select the most adequate plant for this purpose. Furthermore, many criteria were selected and ranked, according to their impact upon the ecosystem in which the technology is to be implemented.

Among all the plants examined, water hyacinth displays the most interesting features, namely, a marked ability to remove pollutants from water (metallic cations, phosphate, nitrate, organic matter, etc.), and high contents in proteins and antioxidizing agents. It also displays an increased resistance towards eutrophic sites, along with an appreciable adaptability to environmental changes. Under suitable conditions, water hyacinth can also afford a considerable biomass productivity of about 200 tons dry weight/ha/year. Nevertheless, the main criterion in favour of this species is undoubtedly the high number of ways in which the water hyacinth biomass can be exploited. As a result, a rational exploitation of water hyacinth, and to lesser extent, of water lettuce or of duckweed, can be regarded as being a very convenient strategy. The main constraint in this regard must be a sustainable development that includes both environmental and socio-economical considerations.

In conclusion, the choice of an appropriate aquatic plant to depollute wastewaters in small settlements in tropical countries, using the satisfaction analysis method, seems to be a suitable tool for obtaining sustainable solutions, without major investments. Due to its high protein level, water hyacinth can be rationally exploited on the surfaces of eutrophic water bodies, by implementing a suitable control of the biomass excess, reducing thereby the environmental impact of such culture. The biomass excess can be optimized, regularly harvested (2 or 3 times per month) and then processed to obtain valuable protein extracts. In this way, the continuous eutrophication process of the water body will contribute to feed the plant growth.

Key words: *water hyacinth, aquatic plants, wastewater treatment, biomass, satisfaction analysis method, multicriteria approach.*

1. INTRODUCTION

L'introduction, dans certains pays tropicaux, de plantes aquatiques à des fins ornementales, a eu pour effet un envahissement incontrôlé, suivi d'un étouffement rapide des plans d'eau et la déstabilisation des écosystèmes aquatiques (GOPAL, 1987; LABRADA et FORNASARI, 2003; PIETERSE et MURPHY, 1990). Ceci a occasionné des pertes socio-économiques et environnementales considérables (MAILU, 2001; MASIFWA *et al.*, 2001; SIMBERLOFF, 1996), surtout dans les pays en voie de développement, là où justement les ressources hydriques sont souvent loin d'être abondantes (TONGO, 1996). Par conséquent, l'élimination de cet impact négatif provoqué par les plantes aquatiques dans les régions tropicales est devenue, par la force des choses, une problématique d'actualité.

Afin de remédier à cette situation dans le cadre d'un développement durable, sans pour autant tendre vers une extermination systématique de ces plantes, à cause de leurs propriétés dépolluantes des eaux usées (AXTELL *et al.*, 2003; BRAMWELL et PRASAD, 1995; QIAN *et al.*, 1999; ZAYED *et al.*, 1998), diverses solutions ont été proposées. Parmi ces solutions, un intérêt particulier a été accordé à la possibilité d'exploiter judicieusement les plantes envahissantes comme sources de biomasse, essentiellement pour l'alimentation du bétail. Par la suite, l'intérêt pour une telle exploitation contrôlée, surtout des plantes flottantes, s'est accru continuellement, surtout après la mise en évidence des potentiels protéiques et antioxydants de certaines d'entre elles, comme la jacinthe d'eau (BODO, 2002; BODO *et al.*, 2004a; BODO *et al.*, 2004b; LAREO et BRESSANI, 1982).

Si une telle alternative s'avérait rentable, elle ne saurait être que bénéfique au développement socio-économique des pays tropicaux souffrant justement d'un tel fléau, plus particulièrement au niveau des petites municipalités riveraines de plans d'eau (JING *et al.*, 2002). Ainsi, il serait possible d'entrevoir la possibilité de cultiver une plante aquatique sur un plan d'eau donné subissant une pollution continue en composés azotés et phosphorés (MARIN, 1993), pour assurer une certaine productivité en biomasse. Dans ce sens, les données présentées dans le tableau 1 mettent en évidence l'importance du choix de la plante aquatique pour optimiser les procédures d'épuration, en concordance avec les potentiels valorisables désirés (AXTELL *et al.*, 2003; FONKOU, 1996; REDDY et DEBUSK, 1987; TRIPATHI *et al.*, 1991).

Tableau 1 Actions dépolluantes et potentiels valorisables des plantes aquatiques.
Table 1 Water cleansing capacities of aquatic plants and potential uses for their biomass.

Types de plan d'eau	Types de plantes aquatiques	Modes d'action en épuration des eaux	Potentiels valorisables
Les marécages naturels et artificiels Les lagunages, Les estuaires Les lacs naturels Les réservoirs Les rivières et les fleuves Les canaux et chenaux Autres	Plantes enracinées Plantes flottantes Plantes immergées Phytoplancton	Absorption de cations métalliques Biodégradation de la matière organique Absorption (PO_4^{3-} , NO_3^- , NH_4^+ , etc.) Clarification de l'eau Régulation du pH	Biomasse (alimentation animale, production d'éthanol, etc.) Protéines Agents antioxydants Cellulose et dérivés

Le choix de la plante à cultiver n'est pas aisé, car il doit satisfaire plusieurs critères (HAUSLER *et al.*, 1994). Ces critères sont de natures diverses et leur sélection n'est pas facile, étant donné la grande diversité des problématiques (CASEY et NEWTON, 1973; SCHIEMER et PROSSER, 1976; TOIVONEN et LAPPALAINEN, 1980). Il faut mentionner que, jusqu'à ce jour, la plupart de ces problématiques se sont axées essentiellement autour de critères purement économiques, ne tenant pas souvent compte des facteurs environnementaux, techniques, sociopolitiques, ergonomiques, etc. (HAUSLER *et al.*, 1994; KIBI *et al.*, 2000).

Aussi, dans le cadre de cette étude, un accent particulier a été mis sur un choix adéquat de plantes aquatiques visant un développement durable, impliquant la capacité de ces plantes à s'adapter à leur milieu de culture avec un impact minimal sur ce milieu. Dans une seconde étape, il s'agissait d'appliquer une méthodologie rigoureuse permettant de mettre en oeuvre une exploitation rationnelle d'une plante aquatique qui puisse présenter des propriétés dépolluantes pouvant réduire le phénomène d'eutrophisation. La croissance de cette plante doit être contrôlée par une exploitation optimisée combinée à une valorisation de la biomasse récoltée comme matière première dans la production de protéines (BODO *et al.*, 2004a).

Dans le présent travail, la problématique envisagée s'est limitée à un nombre restreint de plantes aquatiques, à savoir les lentilles d'eau, la jacinthe d'eau, la laitue d'eau, le papyrus commun et les choux de marais, fréquemment rencontrées dans les milieux pollués (PETER, 2000; QIAN *et al.*, 1999; VAN ZON, 1982). Un choix et une hiérarchisation préalables des principaux critères d'évaluation sont indispensables à la réalisation d'une étude de satisfaction rigoureuse, permettant d'opter pour la meilleure plante à exploiter sur un plan d'eau spécifique et dans un contexte bien délimité.

2. ANALYSE FONCTIONNELLE POUR UNE EXPLOITATION RATIONNELLE D'UNE PLANTE AQUATIQUE

La principale finalité d'une telle démarche réside dans la proposition d'une méthodologie permettant d'aborder les problématiques liées aux lacs et rivières pollués ou eutrophisés, par le biais d'exploitations rationnelles adaptées aux situations respectives. Dans ce cadre, la première priorité consiste à identifier les besoins pour cette démarche, afin de pouvoir entrevoir les solutions possibles.

Dans un premier temps, il s'agira de sensibiliser les populations à protéger les lacs et les rivières au bord desquels elles vivent. Pour ce faire, non seulement un inventaire de l'écosystème est nécessaire mais également une délimitation du cours d'eau s'impose. La production d'une banque de données, accessible aux différents intervenants, est à la fois une solution et une retombée qui supporteront l'ensemble des actions subséquentes. En matière de loi environnementale, il paraît intéressant de renforcer la réglementation pollueurs-payeurs : par exemple, les sanctions, les amendes et les autres moyens coercitifs peuvent être appliqués contre les pollueurs. Les autres activités envisagées, comme la création de comités de vigilance et l'éducation relative à l'environnement peuvent être organisées pour entraîner des actions environnementales d'envergure.

En deuxième lieu, des mesures correctives et technologiques doivent être envisagées pour réduire les apports en polluants. Cela implique diverses solutions : l'application de technologies propres et de programmes d'incitation. Ces derniers visent à encourager les compagnies à mieux protéger l'environnement (subventions, crédits d'impôt, etc.). Il faut aussi signaler les

différents types de traitement possibles de l'eau usée (traitement physico-chimique, biologique, naturel, etc.) comme alternatives pour diminuer le volume ou la charge des polluants dans l'eau. Dans ce contexte, les plantes aquatiques envahissantes s'avèrent être des moyens efficaces pour traiter de manière naturelle cette eau. Cependant, pour une réhabilitation complète du lac, il est parfois essentiel d'enlever, par dragage, les éléments nutritifs et les métaux accumulés dans les sédiments.

Quant à la conservation des ressources naturelles et le développement socioéconomique d'un lac donné, ils semblent incontournables pour une implication à long terme des différents intervenants. À ce niveau, l'élaboration d'un plan d'aménagement pour gérer les sites de conservation *ex situ* ou *in situ* s'avère nécessaire. La création d'un centre d'interprétation de l'écosystème pourrait servir de lieu par excellence où seraient disponibles toutes les informations utiles au public concernant les plantes, les animaux, etc. Les autres alternatives à mentionner sont la mise en place de parcs industriels (éco-industries), l'écotourisme (hôtels, zoo, etc.) et la création de petites entreprises (petites et moyennes entreprises, coopératives, etc.) pour la valorisation des plantes envahissantes.

Cependant, la réussite d'un projet de valorisation de plantes envahissantes repose fondamentalement, dans un premier temps, sur le choix bien défini d'une plante afin de réduire la durée de la phase de recherche, tout en maximisant les chances de développement. Le choix d'une plante épuratrice pour les eaux usées ou la réhabilitation des plans d'eau n'est pas chose aisée. En effet, les caractéristiques épuratoires des plantes doivent répondre à une grande diversité des problématiques. De plus, les contraintes liées à la physiologie de la plante même et au contexte régional sont de natures diverses (CASEY et NEWTON, 1973; SCHIEMER et PROSSER, 1976; TOIVONEN et LAPPALAINEN, 1980).

Le cadre de la présente étude est placé sous l'application d'une méthode d'analyse multicritère simplifiée, basée sur la satisfaction qu'emmène une décision de choisir une plante qui offre le meilleur potentiel global d'application (épuration des eaux, valorisation économique, environnementale et sociale). Cette recherche se limite cependant aux résultats obtenus sur des plantes présélectionnées pour être valorisées au Cameroun. Ces plantes sont les lentilles d'eau, la jacinthe d'eau, la laitue d'eau, le papyrus commun et les choux de marais, fréquemment rencontrés dans les milieux pollués (PETER, 2000; QIAN *et al.*, 1999; VAN ZON, 1982).

Le plan de travail de l'analyse de la satisfaction amène les intervenants à remettre en cause des aspects fondamentaux du sujet à l'étude. Ce faisant, il assure l'identification et

la compréhension, par chacun, des besoins et il oriente la recherche de solutions optimales. Les solutions peuvent donc être classées par ordre croissant du niveau de satisfaction à moindre coût. Les étapes de la satisfaction passent donc par l'identification des besoins, par une analyse fonctionnelle et sa caractérisation (AFNOR, 1998) et finalement, par une évaluation des solutions proposées.

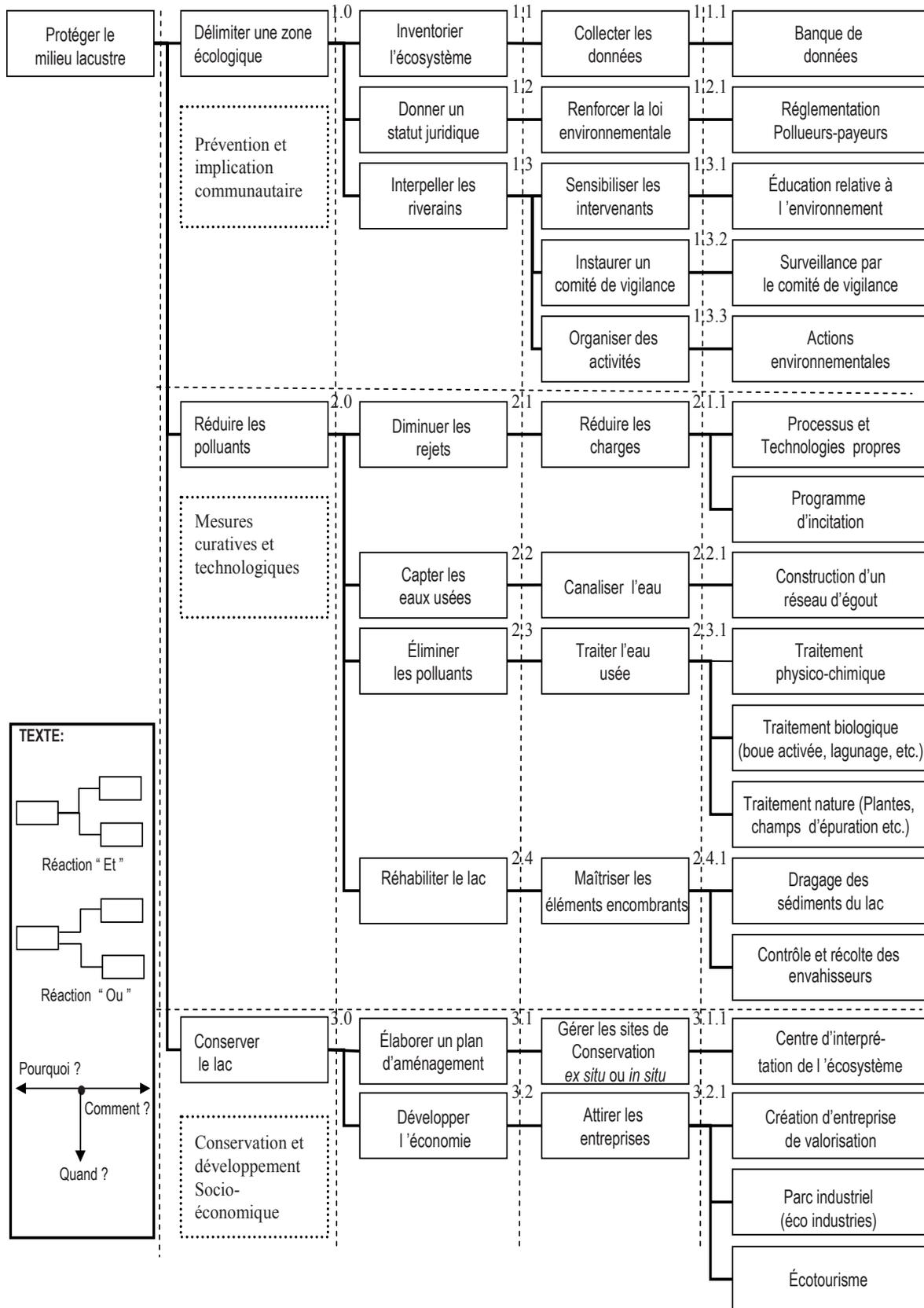
À titre indicatif, l'analyse fonctionnelle consiste à identifier des actions à entreprendre pour satisfaire le besoin. Ce besoin émane naturellement du promoteur du projet (gestionnaire du lac). Cependant, il est préférable que tous les intervenants, présents ou futurs, agissent dès la définition du besoin. Les actions s'énoncent à l'aide d'un verbe et d'un nom pour simplifier la communication et ramener les participants au fondement de la problématique. À partir de ce besoin fondamental, une identification des actions de base et secondaires est élaborée à l'aide de leurs critères d'importance et de leurs interactions. Parallèlement, les solutions sont avancées et envisagées selon les connaissances des intervenants, des experts dans le domaine ou des revues bibliographiques. Une équipe multidisciplinaire est également souhaitable à cette étape. Cette analyse des différentes fonctions permet de réaliser un graphique fonctionnel, tel que présenté dans le tableau 2.

Cette solution graphique, simple à comprendre, présente globalement la hiérarchisation des fonctions entre le besoin et les solutions proposées. Cette démarche peut être transposée en recherche et développement en associant la finalité d'un projet à la validation d'une hypothèse de travail (HAUSLER *et al.*, 1994).

La caractérisation de l'analyse fonctionnelle est une étape qui consiste à préciser le besoin en déterminant les critères à rencontrer ou les contraintes à respecter pour les satisfaire par un élément mesurable. La caractérisation consiste donc à énoncer les critères d'appréciation et les contraintes, préciser leurs niveaux et indiquer la flexibilité de ces niveaux. Pour chacune des fonctions, la caractérisation de l'analyse fonctionnelle exprime, par des critères, leur niveau de tolérance et de flexibilité. Ces niveaux sont représentés par des chiffres compris généralement entre 0 et 10. La flexibilité « 0 » signifie que la fonction n'a aucune tolérance possible. La flexibilité « 10 » dénote une très grande tolérance, c'est-à-dire que le critère peut avoir plusieurs niveaux de flexibilité. Cette caractérisation vise également à développer les termes de l'étude économique finale afin que les solutions répondent adéquatement à la finalité.

Avant d'entamer l'analyse multicritère pour le choix d'une plante aquatique, il est judicieux, dans une première étape, de donner un bref aperçu sur les plantes considérées.

Tableau 2 Schéma fonctionnel permettant une exploitation rationnelle d'une plante aquatique.
Table 2 Functional diagram allowing the rational use of an aquatic plant.



TEXTE:

Réaction "Et"

Réaction "Ou"

Pourquoi ? ← → Comment ?
 ↓
 Quand ?

3. PRÉSENTATION DE QUELQUES PLANTES AQUATIQUES

La jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) est une plante vasculaire d'eau douce, qui possède un pétiole assez long, un limbe cordiforme à nervures arquées, des feuilles arrondies vertes et des épis de fleurs, comme illustrée par les figures 1 à 3. Les lentilles d'eau ou *Lemna minor* L., quant à elles, sont de petites plantes flottantes, qui se présentent sous forme de thalles ronds de 2-5 mm de diamètres et une racine de 25 à 100 mm (Figures 4 et 5). La laitue d'eau (*Pistia stratiotes*) est une autre plante flottante tropicale ayant l'aspect d'une salade

avec des feuilles charnues et longues de 10 à 15 cm comme le montre la figure 6. La dernière plante flottante considérée dans ce travail est le liseron d'eau (*Ipomoea aquatica* Forsskal), qui est du type herbacé. Elle pousse sous forme de tapis flottants à la surface des canaux et des lacs. Ses tiges sont souples, creuses et longues de 3 m ou plus (Figure 7).

Outre ces plantes flottantes, il existe également des végétaux aquatiques dont les racines poussent sur le fond des plans d'eau, tels le papyrus commun (*Cyperus papyrus*), une herbe semi-aquatique ayant des tiges épaisses mais souples, hautes de 3 à 4 m, des inflorescences de 10-30 cm de diamètre et un rhizome rampant. Ses tiges se terminent par des feuilles allongées à l'extrémité desquelles se développent de petites fleurs



Figure 1 Jacinthe et lentilles d'eau dans un marécage en Louisiane (USA).
Water hyacinth and duckweed in Louisiana marsh.



Figure 2 Jacinthe d'eau dans un lac au Cameroun.
Water hyacinth in Cameroon.

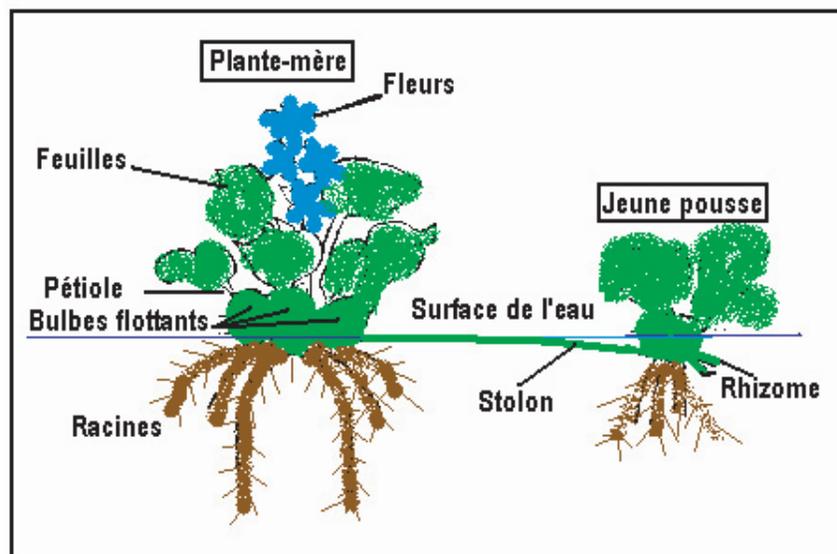


Figure 3 Représentation schématique des composantes de la jacinthe d'eau.
Diagram of Water hyacinth elements.



Figure 4 Lentilles d'eau à la surface d'un étang au Canada.
Duckweed on Canadian marsh.



Figure 5 Culture de lentilles d'eau aux USA pour le traitement des eaux.
Duckweed culture for wastewater treatment in USA.



Figure 6 Laitue d'eau au Cameroun.
Water lettuce in Cameroon.



Figure 7 Liseron d'eau au Cameroun.
Water spinach in Cameroon.



Figure 8 Papyrus commun.
Common papyrus.

verdâtres. Il croît assez rapidement dans les marais permanents eutrophes et le plus souvent en eau peu profonde (Figure 8). Les caractéristiques de toutes ces plantes sont récapitulées dans le tableau 3.

4. IMPACTS DES PLANTES AQUATIQUES ENVAHISSANTES

La plupart des plantes envahissantes présentent de l'intérêt pour une éventuelle exploitation rationnelle, dans le cadre d'un développement durable, en ce sens qu'elles peuvent être cultivées sans investissements importants, pour une production de biomasse à valeur ajoutée. Cependant, pour mieux définir cette notion d'exploitation rationnelle, il serait judicieux, dans un premier temps, de récapituler les principaux

inconvenients (HEAFY et BUSH, 1994; MCCANN *et al.*, 1996; MCCAUSLAND, 2002; SINKALA *et al.*, 2002; VAN ZON, 1982) et avantages sur la protection de l'environnement (AGENDIA *et al.*, 1997; HILL et HILL, 1999; KELLY *et al.*, 1999; LINDSEY et HIRT, 2000; MCCAUSLAND, 2002; PARINET *et al.*, 2000; PATIENCE *et al.*, 1983; QIAN *et al.*, 1999) que présentent l'usage et le développement de ces plantes (Tableau 4).

La synthèse de toutes ces données met en évidence le fait que le choix judicieux d'une plante aquatique donnée, à des fins d'exploitation rationnelle et de dépollution, pourrait constituer une alternative d'avenir, qu'il faudrait généraliser dans tous les pays qui s'y prêtent. Ceci permettrait d'implanter des systèmes écologiques d'épuration des eaux, à l'aide de cultures de plantes aquatiques, qui peuvent vite entrer en équilibre et devenir partie intégrante de l'environnement. De

Tableau 3 Principales caractéristiques des plantes aquatiques sélectionnées.**Table 3 Main features of the selected aquatic plants.**

Caractéristiques	Jacinthe d'eau ^a	Lentille d'eau ^b	Laitue d'eau ^c	Papyrus commun ^d	Liseron d'eau ^e
Origine	Sud Amérique	Nord Amérique, Europe	Tropiques	Afrique	Asie
Zone d'expansion	Régions chaudes et semi-chaudes	Régions tempérées, semi-chaudes et chaudes	Régions tropicales (Afrique, Amérique)	Régions chaudes africaines	Afrique, Asie, Amérique centrale
Milieu de culture	Eaux stagnantes	Eaux stagnantes	Lacs et eaux stagnantes	Zone immergée	Rivières, ponds et marécages
Morphologie	Belle plante flottante avec des fleurs de 15 à 30 cm	Petite plante libre composée de feuilles flottantes	Plante flottante avec des feuilles en rosette	Herbe semi-aquatique	Plante herbacée rampante (eau ou zone humide), avec des fleurs
Dimensions	1 m	0,4-0,6 cm	0,2 m	2-4 m	1- 3 m
Taux de croissance	5-7 % PF/j * 60-110 t/ha/a **	78 t/ha/a **	17 g PS/j *** 50-80 t/ha/a **	20 g PS/j ***	4,8 g PS/j *** 10 t/ha/a **
Mode de multiplication	Bourgeonnement et graine	Bourgeonnement	Bourgeonnement et graine	Bourgeonnement et graine	Bourgeonnement et graine
Température de développement	5-40 °C	5-34 °C	15-30 °C	20-30 °C	Plus de 23 °C
Besoins en phosphore et azote	1950-5850 kg/ha/a 350-1125 kg/ha/a	350-1200 kg/ha/a 116-400 kg/ha/a	1350-5110 kg/ha/a 300-1100 kg/ha/a	--	--
Contenu en N et P	1,5-5 % PS 0,14-1,2 % PS	2,5-5 % PS	2-4 % PS 4,2-5,2 % PS	1-2 % PF 1-2,2 % PF	4,5-6,7 % PS 4,2-5,2 % PS
Teneur en protéines	10-26 % PS	14-40 % PS	30,9 % PS	7-13 % PS	38 – 42 % PS
Utilisation possible	Compost, papier, matelas, fournitures domestiques, suppléments alimentaires pour le bétail, vitamine A et antioxydants .	Suppléments alimentaires pour le volaille, les bovins, les porcs et les poissons.	Aliments de disettes et médicaments.	Papier, nourriture (racines), médicaments et parfums.	Légume consommé par les hommes, les porcs, canards et les poules. Il agirait comme l'insuline.

*PF/j : Poids frais par jour

** t/ha/a : Tonne par hectare par année

*** PS/j : Poids sec par jour

Références citées au tableau 3 / References cited in Table 3

^a GOPAL, 1987; IKETUONYE, 1987; JULIE et ORAPA, 1999; KANNAN et KATHIRESAN, 1999; KELLY et al., 1999; LABRADA, 1998; LABRADA et FORNASARI, 2003; LAREO et BRESSANI 1982; LINDSEY et HIRT, 2000; MURTY et MULENDEMA, 2002; OUEDRAOGO et al., 1999; REDDY et DEBUSK, 1987; SINKALA et al., 2002; SKORUPKA, 1998; YONGHONG XIE et DAN YU, 2003.

^b AXTELL *et al.*, 2003; DEWANJI et MATAI, 1996; JING *et al.*, 2002; HUBAC *et al.*, 1984; MICHAUD *et al.*, 1994.

^c AGENDIA *et al.*, 1997; AZZA *et al.*, 2000; BUI *et al.*, 1999; FONKOU, 1996; GICHUKI *et al.*, 2001; LABRADA et FORNASARI, 2003; MC CANN *et al.*, 1996; PARKINSON et QUIRKE, 1995.

^d AGENDIA, 1995; AZZA *et al.*, 2000; BUI *et al.*, 1999; GICHUKI *et al.*, 2001; KONE, 2002; LABRADA et FORNASARI, 2003; MC CANN *et al.*, 1996; PARKINSON et QUIRKE, 1995.

^e COSTA-PIERCE, 1998; MC CANN *et al.*, 1996; MEKSONGSEE, 1984.

Tableau 4 Avantages et inconvénients de la croissance des plantes aquatiques sélectionnées.
Table 4 Advantages and disadvantages of the selected aquatic plants' growth.

Types d'impacts		Jacinthe d'eau	Lentille d'eau	Laitue d'eau	Papyrus commun	Liseron d'eau
Impacts négatifs	Évapotranspiration	X		X	X	X
	Blocage aussi des installations de pompage d'eau.	X	X	X		X
	Blocage des canaux d'irrigation.	X		X		X
	Obstruction de la navigation	X		X		X
	Baisse de la pêche et la pisciculture	X	X	X		
	Étouffement et écran à la lumière pour les profondeurs du plan d'eau	X		X		X
	Comblement des étangs et les petits lacs				X	X
	Exposition des poissons à la prédation				X	
	Infestation des rizières					
	Prolifération des foyers d'infection	X	X	X	X	X
	Réduction de la biodiversité	X		X	X	X
	Changement de la qualité de l'eau	X		X		
	Vieillessement des réservoirs	X	X	X	X	X
	Impacts positifs	Présentation sous forme plante ornementale	X			X
Absorption des métaux et d'autres composés toxiques (phénol)		X	X	X	X	X
Fixation d'agents polluants		X	X	X	X	X
Croissance rapide et grande biomasse		X	X	X	X	X
Production d'engrais azoté et phosphoré		X	X	X		X
Fourrage pour le bétail		X	X	X		X
Production de biogaz		X		X		X
Usage en pharmacopée		X	X	X		X
Réduction de la croissance des algues par blocage des rayons lumineux		X	X	X	X	X
Réduction de la turbidité de l'eau		X	X	X	X	X
Production de l'oxygène nécessaire à la nitrification		X	X	X	X	X
Prévention de l'érosion		X		X	X	X

telles technologies de dépollution, utilisant divers types de plans d'eau, ont déjà été mises à l'épreuve dans certains pays et les résultats obtenus sont très encourageants (AXTELL *et al.*, 2003; BRAMWELL et PRASAD, 1995; JING *et al.*, 2002).

Quelques technologies dites « vertes » de dépollution des plans d'eau eutrophisés sont énoncées ci-dessous.

5. TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT DES EAUX PAR LES PLANTES AQUATIQUES

L'utilisation de boues activées, de digesteurs ou de lits bactériens pour le traitement des eaux polluées est devenue classique et assez répandue, plus particulièrement dans les pays industrialisés qui disposent des moyens nécessaires. Pour les pays moins développés, il est essentiel d'entrevoir la possibilité

de mettre en œuvre des technologies d'épuration moins onéreuses, qui requièrent moins de moyens et qui cadrent avec les spécificités de ces pays (BRAMWELL et PRASAD, 1995; JING *et al.*, 2002). Parmi ces technologies figurent justement les procédures de traitement de l'eau à l'aide de plantes aquatiques dans des marécages, des lagunes ou des marais, procédures qui seront développées explicitement dans ce qui suit.

5.1 Systèmes de traitements d'eau dans des marécages

Les marécages naturels sont utilisés depuis quelques années pour traiter les eaux, mais ils peuvent s'avérer insuffisants quand le milieu récepteur est trop eutrophe. Cette carence a stimulé le développement de systèmes de marécages artificiels, plus flexibles et plus performants dans ce sens. Il existe deux variantes de ce type de technologie : 1. le décanteur-digester anaérobie avec grillage, où sont cultivés de la laitue d'eau et/ou du papyrus commun; 2. le marécage, contenant des bactéries et des plantes spéciales dépolluantes. Ce type de technologie, en fonction depuis une décennie, est assez rentable, et peut

être appliqué aux traitements des eaux usées industrielles, municipales ou agricoles. Les principaux polluants pouvant être éliminés par un tel système sont les nitrates, les phosphates et les métaux lourds (BRAMWELL et PRASAD, 1995; QIAN *et al.*, 1999).

5.2 Systèmes de traitements d'eau par lagunage des plantes aquatiques

Un traitement par lagunage ne pourrait être efficace sans la présence simultanée de bactéries, de zooplancton, de plantes aquatiques et d'algues. Ainsi, cette technologie combine les performances de dépollution des bactéries et des macrophytes, qui jouent le rôle d'agents filtrants et d'assimilation des nitrates et des phosphates. Les plantes aquatiques qui s'adaptent le mieux à ce système d'épuration sont le plus souvent : la laitue d'eau, la jacinthe d'eau, le papyrus commun et le liseron d'eau. De plus, ces plantes dégagent assez d'oxygène au niveau des racines, des feuilles et des stolons pour permettre aux bactéries aérobies de consommer la matière organique présente (JING *et al.*, 2002; LIN *et al.*, 2002).

5.3 Systèmes à base de marais épurateurs

Les systèmes d'épuration à base de marais correspondent en fait à des installations de phyto-épuration et deviennent vite des écosystèmes en équilibre avec le milieu environnant. Ils consomment très peu d'énergie et combinent les effets bénéfiques du sol, des microorganismes et des plantes aquatiques. La qualité de ce type de technologie laisse présager une application aux traitements des eaux usées issues des petites villes, des petites entreprises et des campagnes, car il nécessite très peu d'investissement (BRAMWELL et PRASAD, 1995; MARIN, 1993; REDDY et DEBUSK, 1987).

6. CHOIX D'UNE PLANTE POUR EXPLOITATION RATIONNELLE À DES FINS ENVIRONNEMENTALES

Un choix rigoureux doit se baser sur un certain nombre de critères objectifs, eux-mêmes sélectionnés judicieusement, faisant un compromis entre les avantages et les inconvénients de la culture éventuelle de chacune des plantes dans des contextes bien déterminés. A priori, les plantes citées semblent être toutes intéressantes pour une culture rationnelle à des fins de dépollution, en ce sens qu'elles s'adaptent assez bien dans les milieux eutrophisés (excès d'azote et de phosphore), les milieux pollués (métaux lourds, pesticides, herbicides, etc.) et qu'elles produisent une biomasse végétale valorisable en protéines et en agents antioxydants pour certaines d'entre elles. Néanmoins, des critères supplémentaires sont requis pour

l'implantation de technologies économiques, ne nécessitant pas ou peu d'investissements dans des pays moins développés, où les phénomènes de pollution deviennent de plus en plus contraignants. Dans ce contexte très spécifique, la multiplicité des voies de valorisation de la plante sélectionnée pour une telle culture rationnelle devra être considérée comme étant un facteur déterminant.

Les solutions proposées reposent également sur des critères d'évaluation qui sont énoncés par une équipe multidisciplinaire regroupant tous les intervenants concernés ou une personne selon une philosophie transdisciplinaire. Afin de déterminer la force ou le poids d'un critère d'évaluation, un facteur de 1 à 10 lui est octroyé par l'équipe multidisciplinaire (10 étant le facteur le plus important et 1 le facteur le moins important). Cette pondération est arbitraire et est obtenue par consensus (table ronde) ou par la méthode Delphi (PRADES, 1997). Dans une approche systémique axée sur une évolution responsable, ces critères doivent intégrer l'ensemble des préoccupations tangibles ou intangibles d'ordre technique, environnemental, social et économique. Toutefois, ces préoccupations ne doivent pas être incluses ou intégrées monétairement dans le calcul coût-bénéfice. Une fois les critères et leur force déterminés, une équipe d'experts scientifiques assigne pour chaque critère les gains apportés par chacune des solutions (10 étant le gain maximal souhaité et 0 un gain nul). Cette pondération est également arbitraire. Elle est relative à la meilleure technologie et basée sur des connaissances actuelles ou théoriques. Cette pondération est obtenue également par consensus entre les intervenants.

Une analyse préliminaire des données présentées dans le tableau 5 montre, d'ores et déjà, que la jacinthe d'eau semble être la plante qui présente la plus grande diversité de voies de valorisation, pouvant être utilisée comme matière première pour la fabrication de produits nutraceutiques, agents de dépollution des eaux et comme biomasse dans diverses autres activités humaines (BUI *et al.*, 1999; COSTA-PIERCE, 1998; DEWANDJI et MATAI, 1996; GICHUKI *et al.*, 2001; HUBAC *et al.*, 1984; LAREO et BRESSANI, 1982; LINDSEY et HIRT, 2000; MC CANN *et al.*, 1996; OUDHIA et TRIPATHY, 2002; PAOLETTI, 2002; PARKINSON et QUIRKE, 1995).

La méthodologie utilisée pour un choix objectif de la plante en vue d'une exploitation rationnelle implique une analyse sur la base d'une multitude de critères. Bien qu'il existe de nombreuses méthodes ou techniques multicritères (HAUSLER *et al.*, 1994; ROY et BOUYSSOU, 1993), celles-ci sont souvent compliquées et basées sur le calcul des données aboutissant à des valeurs quantitatives. L'obtention de telles valeurs peut être laborieuse, coûteuse ou même impossible. Dans un contexte de recherche et développement, il est possible d'utiliser des méthodes plus simples, tout en gardant une approche quantitative. Une analyse

Tableau 5 Voies de valorisations supérieures de quelques plantes aquatiques.
Table 5 High value-added pathways for the selected aquatic plants.

Voies de valorisations		Jacinthe d'eau	Lentille d'eau	Laitue d'eau	Papyrus commun	Liseron d'eau
Valeur nutraceutique	Valeur nutritive pour les animaux	X	X	X		X
	Valeur nutritive pour les humains	X				X
	Médicaments	X		X	X	X
	Potentiel antioxydant	X		X		X
	Présence de vitamines	X	X			X
	Extraction des protéines	X	X	X		X
Dépollution	Absorption de la matière organique	X	X	X	X	X
	Absorption des métaux lourds	X	X	X	X	X
	Réduction des particules en suspension	X	X	X	X	X
	Baisse de l'eutrophisation	X	X	X	X	X
	Oxygénation de l'eau par les racines	X		X		
Biomasse	Fertilisants	X	X	X		X
	Papier	X			X	
	Manufactures artisanales	X			X	
	Carburant alternatif (éthanol)	X			X	
	Biogaz	X	X	X		X

Tableau 6 Hiérarchisation des critères retenus.
Table 6 Ranking of the retained criteria.

Critères	Poids	Pondération de chaque critère par type de plante/Satisfaction				
		Jacinthe	Lentilles	Laitue	Papyrus	Liseron
Critères d'ordre technologique	P_i^*	P_e^{**}/S^{***}	P_e^{**}/S^{***}	P_e^{**}/S^{***}	P_e^{**}/S^{***}	P_e^{**}/S^{***}
Adaptabilité au milieu de culture	10	10/100	5/50	10/100	7/70	6/60
Facilité d'exploitation	10	8/80	10/100	6/60	5/50	5/50
Productivité en biomasse	9	10/90	9/81	10/90	6/54	8/72
Adaptabilité aux variations brusques	8	10/80	7/56	10/80	8/64	8/64
Potentiel protéique	7	8/56	9/63	7/49	5/35	10/70
Teneur en composés antioxydants	7	10/70	7/49	6/42	5/35	9/63
Tolérance à l'eutrophisation et aux parasites	5	10/50	10/50	10/50	8/40	8/40
Critères d'ordre environnemental						
Efficacité d'absorption azote et phosphore	10	5/50	10/100	10/100	5/50	6/60
Efficacité d'absorption des métaux	8	10/80	10/80	10/80	5/40	7/56
Efficacité d'absorption de la matière organique	8	10/80	10/80	10/80	5/40	6/48
Préservation des ressources hydriques (évapotranspiration)	7	5/35	10/70	6/42	9/63	8/56
Préservation de l'écosystème aquatique	6	10/60	8/48	9/54	8/48	8/48
Critères d'ordre socio-économique						
Diversité des voies de valorisation	10	10/100	6/60	5/50	7/70	7/70
Gain suite à une exploitation rationnelle	9	10/90	8/72	10/90	6/54	7/63
Préservation des voies navigables	8	5/40	8/64	6/48	10/80	7/56
Esthétique et cadre touristique	7	10/70	5/35	7/49	10/70	9/63
Préservation des zones de pêche	5	5/25	5/25	5/25	10/50	7/35
Somme $\Sigma(P_i \times P_e)$	133	1 146	1 083	1 089	913	974
Classement		1	3	2	5	4

* P_i : Poids du critère i

** P_e : Pondération d'évaluation de la plante pour chaque critère par rapport à une autre plante

*** S : Satisfaction

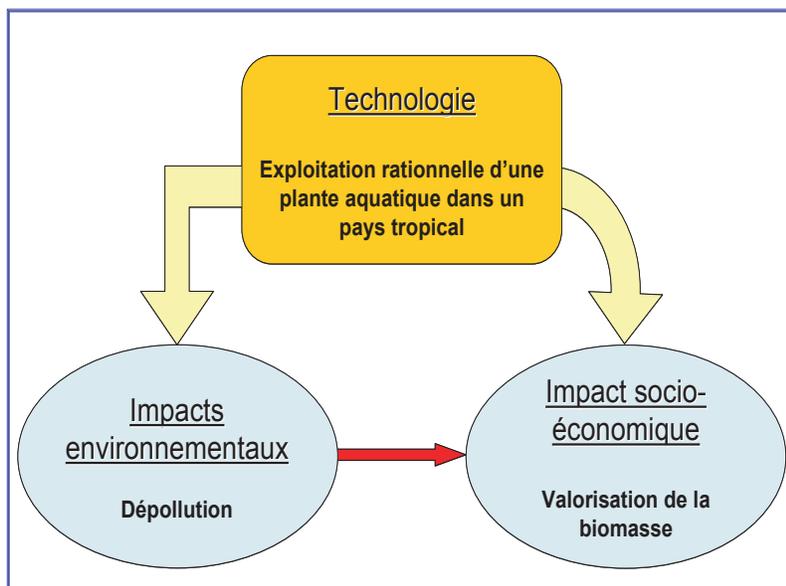


Figure 9 Hiérarchisation des critères pour l'optimisation de l'impact socio-économique.
Ranking of the criteria to optimize the socio economic impact.

de satisfaction effectuée par CONRAUD (2002) et inspirée de l'analyse de la valeur (HAUSLER *et al.*, 1994), permet de soutenir la prise de décision dans le cas d'une carence de données mesurables. Une hiérarchisation préalable de tous les critères pris en considération dans la réalisation de la présente étude, sur la base d'une échelle de pondération variant de 1 à 10, a permis de ne retenir que ceux présentant des valeurs supérieures ou égales à 5 (Tableau 6).

Il faudrait insister sur le fait que cette hiérarchisation des critères, dite verticale, est subjective. Elle varie d'un observateur à un autre et d'un contexte à un autre, surtout lorsqu'il s'agit de généralisation de cette technologie d'exploitation rationnelle des plantes aquatiques à des fins environnementales. Cependant, il reste possible de réduire cette subjectivité en restreignant la problématique à des cas très spécifiques. D'une manière objective, il faudrait s'attendre à ce qu'un certain nombre de critères puisse présenter une plus grande pondération que d'autres. Dans le cas présent, il serait judicieux de limiter la gamme des plantes aquatiques à ces cinq espèces et le lieu d'application d'une exploitation rationnelle de celles-ci aux seuls pays tropicaux. Dans ce contexte précis, les critères d'ordre technologiques et ensuite environnementaux deviendront prioritaires par rapport aux critères socio-économiques (Figure 9). Ceci peut être expliqué par le manque de technologies et la vulnérabilité de ces pays face à des accidents ou bouleversements écologiques.

Fondamentalement, cette méthode est basée sur un principe de consensus et de gouvernance avec l'implication des différents acteurs concernés par la prise de décision. Cependant, il peut aussi être un outil individuel pour orienter et se convaincre d'une telle démarche.

Dans une seconde étape, une analyse de satisfaction est réalisée sur la base de cette hiérarchisation. Ainsi, une autre hiérarchisation, cette fois-ci dite horizontale, est effectuée en associant pour chaque plante aquatique une pondération (P_i) pour chaque critère, estimé le plus objectivement possible selon une échelle croissante similaire de 1 à 10 et tenant compte de la spécificité du contexte considéré. La pondération attribuée dans cette seconde étape est multipliée par le poids attribué à chaque critère (P_j). Le choix d'une plante s'effectue ensuite à partir d'un classement réalisé sur la base de totaux de points accumulés pour chaque plante par une telle méthode (HAUSLER *et al.*, 1994; ROY et BOUYSSOU, 1993).

La sommation des résultats obtenus pour chacune des solutions permet rapidement un classement des solutions par ordre croissant d'intérêt. Pour les solutions les plus intéressantes, un programme d'essais se doit d'être réalisé pour déterminer la solution la plus favorable et la plus économiquement réalisable. Ainsi, pour finaliser l'analyse de la valeur, le rapport qualité/coût-bénéfice doit être évalué en fonction des coûts estimatifs de construction et d'exploitation actualisés moins les bénéfices monétaires enregistrables.

Il ressort clairement que la jacinthe d'eau et, à un degré moindre, la laitue d'eau et les lentilles d'eau, se prêtent le mieux à une exploitation rationnelle dans un pays tropical ayant de faibles ressources financières. L'exploitation de la laitue d'eau semble, toutefois, être défavorisée par la faiblesse de sa valeur nutraceutique, le nombre limité de voies de valorisation de sa biomasse et surtout les désagréments (démangeaisons) causés aux travailleurs lors de sa récolte et sa manipulation (PIRIE, 1971).

7. IMPACT ENVIRONNEMENTAL - COMPORTEMENT DES RACINES EN DÉPOLLUTION

L'eutrophisation, processus naturel mais accéléré par les activités humaines, accroît les quantités de phosphore et d'azote dans le milieu aquatique. La plupart de ces plantes aquatiques utilise ses agents d'eutrophisation comme nutriments (MAHUCHARIYAWONG et IKEDA, 2001). Les racines de ces plantes favorisent la fixation et la croissance de nitrobactéries permettant la diminution de l'azote ammoniacal (COSTA-PIERCE, 1998). Cette symbiose entre les nitrobactéries et les racines rend ces plantes plus intéressantes à utiliser dans une lutte contre l'eutrophisation d'un lac.

Selon certains chercheurs un rapport critique C:N (carbone : azote nitrique ($\text{NO}_3\text{-N}$)) de 5 : 1 permet l'enlèvement de la totalité des nitrates contenus dans un milieu aquatique contenant certains types de plantes aquatiques (*Ipomoea aquatica*, *Pistia stratiotes*, etc.) (LIN *et al.*, 2002). Toutefois, la jacinthe d'eau enlève très peu d'azote minéral ($\text{NH}_4\text{-N}$) par rapport aux lentilles d'eau. La charge en demande chimique en oxygène (DCO) libérée par celle-ci est autour de 2 g/m²/jour. D'ailleurs, les lentilles d'eau produisent une plus grande quantité d'oxygène dissous que la jacinthe d'eau. Cependant, 50 % des lentilles d'eau sont inhibées dans leur croissance quand elles sont exposées à des concentrations de l'ordre de 6,3-8,5 mg/L d'ammoniaque libre (COSSU *et al.*, 2001).

L'enlèvement des métaux lourds de plans d'eau pollués peut se réaliser par l'action des racines ou par d'autres parties des plantes aquatiques (KELLY *et al.*, 1999). Toutefois, la jacinthe d'eau et la laitue d'eau, malgré leur grande capacité à fixer les métaux, restent assez vulnérables à un excès important de cuivre dans le milieu (KLUMPP *et al.*, 2002). Les lentilles d'eau, quant à elles, résistent moins à un excès de métaux du type Cd, Cu, Mn, Ni ou Pb (HUBAC *et al.*, 1984).

L'oxygène est indispensable à l'équilibre de la faune et de la flore de l'écosystème aquatique. Dans les lacs et les autres cours d'eau envahis par les plantes aquatiques, la couverture végétale constitue un obstacle pour le passage de la lumière et la dissolution de l'oxygène atmosphérique. Dans ces conditions, même le phytoplancton ne peut contribuer à l'oxygénation de l'eau, ne pouvant recevoir de lumière. Il est donc contraint à disparaître, ce qui affecte directement la faune aquatique. Pour remédier à cet inconvénient, un enlèvement contrôlé de la jacinthe d'eau est vivement recommandé, faisant augmenter la teneur en oxygène dans le cours d'eau (PARINET *et al.*, 2000; REDDY et DEBUSK, 1987).

8. IMPACT SOCIO-ÉCONOMIQUE - VALORISATION DE LA BIOMASSE

Que faire d'autre de cette biomasse? La transformation en méthane paraît être une des voies logiques, mais elle n'a pas été abordée dans le cadre de cette étude. Il faut toutefois souligner que l'étude des plantes aquatiques a mis en évidence l'existence d'une grande quantité de molécules chimiques dont les spécificités sont remarquables : acides aminés, acides à longues chaînes, terpènes spéciaux, etc. (BODO *et al.*, 2004a; GARNEAU et COLLIN, 1995).

La valorisation de la biomasse est un des aspects les plus importants de cette approche. Compte tenu de la teneur en protéines de la laitue d'eau, par exemple, qui pousse sur les eaux usées et de leur haute production dans les lagunages à macrophytes, les possibilités de valorisation semblent multiples et leurs intérêts financiers ne sont, sans doute, pas négligeables. La fabrication de compost avec cette plante est tout à fait satisfaisante. La laitue se décompose très vite, la phase de dégradation dure 15 jours environ alors que la maturation se prolonge jusqu'au troisième mois. Les valeurs de C : N aux alentours de 10 montrent que les composts sont équilibrés. Les perspectives sont donc intéressantes. Cela se vérifie aussi pour le cas de la jacinthe d'eau ou les lentilles d'eau.

La productivité en biomasse, la diversité des voies de valorisation, ainsi que la valeur nutritive de cette biomasse sont les principaux critères ayant permis d'orienter le choix de la plante aquatique. Grâce à ces critères, la jacinthe d'eau, la laitue d'eau et les lentilles d'eau occupent une place privilégiée pour l'implantation d'une exploitation rationnelle à des fins environnementales dans les pays tropicaux. Sans être prioritaires, dans notre présente démarche, des retombées socio-économiques peuvent inévitablement se produire, ce qui donne des arguments supplémentaires aux décideurs.

La composition de la matière sèche de ces plantes aquatiques est presque comparable à celle de nombreuses plantes terrestres. À titre d'exemple, les lentilles d'eau ont un taux protéique relativement élevé (10-30 %), et d'autres plantes aquatiques sont même plus riches en carotène et xanthophylle que plusieurs plantes terrestres (CHARA *et al.*, 1999). Les acides aminés de nombreuses plantes aquatiques sont comparables aux exigences de la FAO en la matière. Par ailleurs, la teneur élevée en lysine peut être avantageusement valorisée en nutrition dans les pays du tiers monde. À ce sujet, les lentilles d'eau, la jacinthe d'eau, et à un degré moindre la laitue d'eau, peuvent même être consommées par les humains (DEWANDJI et MATAI, 1996; HUBAC *et al.*, 1984; LINDSEY et HIRT, 2000).

Hormis les applications susmentionnées, il faut signaler que la biomasse de la jacinthe d'eau se prête à une grande diversité de voies de valorisation dans les domaines les plus variés, allant du compostage, à la fabrication de protéines, d'agents antioxydants comme le glutathion chez la jacinthe d'eau (BODO *et al.*, 2004a), de pâte à papier, de matériaux pour l'artisanat, etc.

9. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Un système de traitement des eaux utilisant les plantes aquatiques peut être aisément implanté, avec un impact positif certain, au voisinage des petites localités, dans les pays tropicaux en voie de développement. Pour atteindre un tel objectif, il serait judicieux d'adapter la culture d'une plante aquatique donnée, dûment sélectionnée, dans un plan d'eau voisin d'une source continue de pollution. Une sélection et une hiérarchisation préalables des principaux critères permettant de procéder à un tel choix sont indispensables. Par la suite, la réalisation d'une étude de satisfaction rigoureuse permettra de faire démarquer la meilleure plante à exploiter sur un plan d'eau spécifique et dans un contexte bien défini. La jacinthe d'eau s'avère être la meilleure alternative. Elle offre simultanément un grand pouvoir de dépollution des plans d'eau, une valeur nutraceutique élevée de sa biomasse, une diversité des voies de valorisation de cette dernière ainsi qu'une facilité d'exploitation par des technologies économiques. Une exploitation judicieuse de cette plante dans un plan d'eau continuellement pollué ne posera plus de problèmes de rentabilité. La productivité sera assurée par la récolte d'un excédent de jacinthes d'eau, sans investissement majeur, tenant compte de la fréquence de récoltes et des besoins en dépollution. Une récolte fréquente et contrôlée de l'excédent de jacinthes d'eau est essentielle dans la mesure où elle permet de mieux maîtriser le taux de recouvrement de la surface du plan d'eau par la plante aquatique.

Il est souhaitable qu'une telle démarche soit suivie d'une expérimentation pour une validation scientifique de la méthodologie développée. Toutefois, une estimation des coûts d'une telle exploitation doit être faite pour s'assurer que les futurs exploitants pourront poursuivre un tel projet avec certitude. Le taux de satisfaction doit être associé à ces coûts. Cette démarche permettra de préserver l'environnement tout en exploitant les ressources disponibles.

REMERCIEMENTS

Les remerciements vont au Professeur Frédéric Monette, de l'École de technologie supérieure de Montréal et à M^{me}

Maria Cedan (STEPPE-ETS) pour leur précieuse assistance technique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR, 1998. Value Management Handbook (1^{re} publication en 1994) sous la référence : EUR 1 6096 EN et repris dans le recueil de normes « De l'analyse de la valeur au management par la valeur ».
- AGENDIA P.L., 1995. Treatment of sewage using aquatic plants. Case of Biyeme Assi domestic sewage (Yaoundé). Thèse de doctorat. Université Yaoundé I, Yaoundé, Cameroun, 84 p.
- AGENDIA P.L., KENGNE N.Y.M., FONKOU T., MEFENYA T. et J.-D. SONWA, 1997. Production du compost à partir de la biomasse de *Pistia stratiotes* : épuration des eaux domestiques à Yaoundé (Cameroun). *Cab. Agric.*, 6, 15-19.
- AXTELL N.R., STERNBERG S.K. et K. CLAUSSEN, 2003. Lead and nickel removal using *Microspora* and *Lemna minor*. *Bioresour. Technol.*, 89, 41-48.
- AZZA N.G.T., KANSIIME F., NALUBEGA M. et P. DENNY, 2000. Differential permeability of papyrus and *Miscanthidium* root mats in Nkivubo swamp, Uganda. *Aquat. Bot.*, 67, 169-178.
- BODO R., 2001. Photos personnelles.
- BODO R., 2002. Incidence sur l'environnement et la biodiversité des activités de valorisation de plantes à des fins nutraceutiques. Institut des sciences de l'environnement. Synthèse environnementale. Université du Québec à Montréal (UQAM), Montréal, Canada, 55 p.
- BODO R., AZZOUZA. et R. HAUSLER, 2004a. Antioxidative activity of water hyacinth components. *Plant Sci.*, 166, 893-899.
- BODO R., AHMANACHE K., HAUSLER R. et A. AZZOUZ, 2004b. Optimized extraction of total proteic mass from water hyacinth dry leaves. *J. Env. Eng. Sci.*, 3, 529-536.
- BRAMWELL S.A. et P.V.D. PRASAD, 1995. Performance of a small aquatic wastewater treatment system under Caribbean conditions. *J. Environ. Manage.*, 43, 213-220.
- BUI M. D., DEBBIE H., LE T.B.M., HA A.D., TRINH M.C., HUYNH H.N. et T.K. PHAN, 1999. Iron and vitamin C

- content of commonly consumed foods in Vietnam. *Asia Pac. J. Clin. Nutr.*, 8, 36-37.
- CASEY H. et P.V.R. NEWTON, 1973. The chemical composition and flow of the river Frome and its main tributaries. *Freshwat. Biol.*, 3, 317-333.
- CHARA J., PEDRAZA G. et N. CONDE, 1999. The productive waste water decontamination system: a tool for protecting water resources in the tropics. *Livestock Res. Rural Dev.*, 11, 4-10.
- CONRAUD T., 2002. Analyse de sensibilité catégorielle : nouvelle approche de consensus construit dans un contexte de carence de données et de divergence d'opinion en matière environnementale. Thèse de doctorat. Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 212 p.
- COSSU R., HAARSTAD K., LAVAGNOLO M.C. et P. LITTARRU, 2001. Removal of municipal solid waste COD and $\text{NH}_4\text{-N}$ by phyto-reduction: A laboratory scale comparison of terrestrial and aquatic species at different organic loads. *Ecol. Eng.*, 16, 459-470.
- COSTA-PIERCE B.A., 1998. Preliminary investigation of an integrated aquaculture-wetland ecosystem using tertiary treated municipal wastewater in Los Angeles County, California. *Ecol. Eng.*, 10, 341-354.
- DEWANDJI A. et S. MATAI, 1996. Nutritional evaluation of leaf protein extracted from three aquatic plants. *J. Agric. Food Chem.*, 44, 2162-2166.
- FONKOU T., 1996. L'épuration par voie naturelle des eaux usées du campus de l'Université de Yaoundé I. Thèse de doctorat, Univ. Yaoundé I, Yaoundé, Cameroun, 148 p.
- GARNEAU F.-X., COLLIN G.J., 1995. Valorisation de la biomasse végétale par les produits naturels. Actes du colloque de Chicoutimi, 22-25 août 1993, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi. Ottawa, Ontario, Canada, IDRC. 328 p.
- GICHUKI J., GUEBAS F.D., MUGO J., RABUOR C.O., TRIEST L. et F. DEHAIRS, 2001. Species inventory and the local uses of the plants and fishes of the lower Sondu Miriu wetland of Lake Victoria, Kenya. *Hydrobiol.*, 458, 99-106.
- GOPAL B., 1987. Water Hyacinth. ELSEVIER, Amsterdam, Holland. 471 p.
- HAUSLER R., HADE A. et P. BERON, 1994. Total quality management for environment. A new approach for the choice of purification technology. Proceedings Earthcare 1994, 8-10 novembre, INSA-Toulouse, France, 9 p.
- HEAFY M. et P. BUSH, 1994. Duck weed. *Conserv.*, 49, 2-3.
- HILL L., HILL N., 1999. Planting the pond. *Country J.*, 26, 38-40.
- HUBAC J.-M., BEUFFE H., BLAKE G., CORRADI M., DUTRATRE A., VANCOULOUX M. et M. VUILLOT, 1984. Les plantes aquatiques utiles : les lentilles d'eau ou Lemnacées. Utilisation en phytoépuration et valorisation. Association française pour l'étude des eaux. Paris, France, 115 p.
- IKETUONYE M.M., 1987. Contribution to the study of aquatic macrophytes in Cameroon: their biology, ecology and phytosociology in natural ecosystems and in phytodepurational systems. Thèse de doctorat, Université Yaoundé I, Yaoundé, Cameroun, 168 p.
- IOBC/IMPECCA, 2002. Newsletter, published jointly by the Organisation of the International Biological Control and IMPECCA, 5, 3-4.
- JING S.-R., LIN Y.-F., WANG T.-W. et D.-Y. LEE, 2002. Microcosm wetlands for wastewater treatment with different hydraulic loading rates and macrophytes. *J. Environ. Qual.*, 31, 690-606.
- JULIE M.H. et W. ORAPA, 1999. Structure and management of successful biological control project for water hyacinth. Proceedings of the first IOBC Global Working Group Meeting for the Biological and Integrated Control of Water Hyacinth. 16-19 novembre 1998. Harare, Zimbabwe. Plant Protection Research Institute, Pretoria, 123-134.
- KANNAN C. et R.M. KATHIRESAN, 1999. Biological control at different growth stages of water hyacinth. Proceedings of the first IOBC Global Working Group Meeting for the Biological and Integrated Control of Water Hyacinth. 16-19 novembre 1998. Harare, Zimbabwe. Plant Protection Research Institute, Pretoria, 1-8.
- KELLY C., MIELKE R.E., DIMAQUIBO D., CURTIS A. et J.G. DEWITT, 1999. Absorption of Eu (III) onto roots of water hyacinth. *Environ. Sci. Technol.*, 33, 1439-1443.
- KIBI N., SASSEVILLE J.-L., MARTEL J.-M. et J.-F. BLAIS, 2000. Choix multicritères de procédés d'épuration des eaux usées municipales. *Rev. Sci. Eau*, 13, 21-38.
- KLUMPP A., BAUER K. FRANZ-GERSTEIN, C. et M. DE MENEZES, 2002. Variation of nutrient and metal

- concentration in aquatic macrophytes along the Rio Cachoeira in Bahia (Brazil). *Environ. Int.*, 28, 165-171.
- KONE D., 2002. Épurations des eaux usées par lagunage à microphytes et macrophytes (*Pistia stratiotes*) en Afrique de l'Ouest et du Centre. État des lieux, performances épuratoires et autres dimensionnements. Thèse de doctorat N° 2653, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 170 p.
- LABRADA R., 1998. Lutte intégrée contre la jacinthe d'eau et autres plantes aquatiques nuisibles. Rapport de la FAO. Bamako, Mali, 8-11 avril 1997. TCP/MLI 66/13A, 6-8.
- LABRADA R. et L. FORNASARI, 2003. Management of problematic aquatic weeds in Africa, FAO efforts and achievements during the period of 1999-2001. Rome, 28 p.
- LAREO L. et R. BRESSANI, 1982. Possible utilization of the water hyacinth in the nutrition and industry. The United Nations University Press. *Food Nutr. Bull.*, Tokyo, Japan, 4, 60-64.
- LIN Y.-F., JING S.-R., WANG T.-W. et D.-Y. LEE, 2002. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands. *Environ. Pollut.*, 119, 413-420.
- LINDSEY K. et H.-M. HIRT, 2000. Use water hyacinth! Marianum Press, Kisubi, Uganda. 114 p.
- MAHUJCHARIYAWONG J. et S. IKEDA, 2001. Modelling of environmental phytoremediation in eutrophic rivers-the case of water hyacinth harvest in Tha-Chin River, Thailand. *Ecol. Model.*, 142, 121-134.
- MAILU, A.M., 2001, Preliminary assessment of the social, economic and environmental impacts of water hyacinth in the Lake Victoria basin and the status of control. Biological and Integrated Control of Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes*. ACIAR Proceedings N° 102, 130-133.
- MARIN M., 1993. Système d'aquaculture appliqué au traitement des eaux usées pour les petites municipalités. *Sci. Tech. Eau*, 5, 33-40.
- MASIFWA W.F., TWONGO T. et P. DENNY, 2001. The impact of water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart). Solms on the abundance and diversity of aquatic macroinvertebrates along the shores of northern Lake Victoria, Uganda. *Hydrobiol.*, 452, 79-88.
- MC CAUSLAND J., 2002. Trickle Fountain. *Sunset*, 209, 76-77.
- McCANN J.A., ARKIN L.N. et J.D. WILLIAMS, 1996. Nonindigenous aquatic and selected terrestrial species of Florida. Status, pathways and time of introduction, present distribution, and significant ecological and economic effects. University of Florida Center for Aquatic Plants. Florida, USA. Chap. 3, section 1, 14-16.
- MEKSONGSEE L., 1984. Determination of protein, fat and nucleic acid in water hyacinth. Dans : Proceedings International Conference on Water Hyacinth, THYGARAJAN G. (éditeur), UNEP, Nairobi, Kenya, 374-378.
- MICHAUD C., MARIN M. et N. RONDEAU, 1994. Déphosphatation par les plantes aquatiques. *Sci. Tech. Eau*, 27, 33-40.
- MONETTE F. et J.-F. BERGERON, 2002. Photos personnelles.
- MURTY A.S. et B.C. MULENDEMA, 2002. Growth of water hyacinth on Lake Kambe and planning for integrated control. Proceedings First IOBC water hyacinth group, 119-122.
- OUDHIA P. et R. S. TRIPATHY, 2002. Prospects of cultivation of medicinal plants in Chhattisgarh, India, Dans : Recent Progress in Medicinal Plants, 5, Crop Improvement, Production Technology, Trade and Commerce, *Sci. Tech. Pub.*, USA, 211-236.
- OUEDRAOGO L.R., DABIRE R.J., OUEDRAOGO M., BELEM M. et O. BOGNOUNOU, 1999. Integrated management of water hyacinth in Burkina Faso. Proceedings of the first IOBC Global Working Group Meeting for the Biological and Integrated Control of Water Hyacinth. 16-19 novembre 1998. Harare, Zimbabwe. Plant Protection Research Institute, Pretoria, 153-159.
- PAOLETTI M.G., 2002. Agriculture reform in China. *Econ. Bot.*, 56, 214-215.
- PARINET B., LHOTE A., LEGUBE B. et M.A. GBONGUE, 2000. Étude analytique et statistique d'un système lacustre soumis à divers processus d'eutrophisation. *Rev. Sci. Eau*, 13, 237-267.
- PARKINSON R. et S. QUIRKE, 1995. Egyptian bookshelf: Papyrus. Austin, University of Texas Press, 1-2.

- PATIENCE R.L., STERRY P.R. et J.D. THOMAS, 1983. Changes in chemical composition of a decomposing aquatic macrophyte, *Lemna paucicostata*. *J. Chem. Ecol.*, 9, 889-909.
- PETER T., 2000. Interaction between fish and aquatic macrophytes in inland waters. A review. FAO Technical Paper, N° 396 FAO. Rome, Italy, 185 p.
- PIETERSE A.H. et K.J. MURPHY (Éditeurs), 1993. Aquatic weeds. The ecology and management of nuisance aquatic vegetation. Oxford University Press, 45-100.
- PIRIE N.W., 1971. Leaf Protein: Its agronomy, preparation, quality and use. *IBP Handb.*, 20, 37-39; 44-49.
- PRADES J., 1997. Les systèmes intégrés d'aide à la décision dans le secteur de l'environnement. *Nat. Sci. Soc.*, 5, 63-66.
- QIAN J.-H., ZAYED A., ZHU Y.-L., YU M. et N. TERRY, 1999. Phytoaccumulation of trace elements by wetlands plants: III. Uptake and accumulation of ten trace elements by twelve plant species. *J. Environ. Qual.*, 28, 1448-1455.
- REDDY K.R. et T.A. DEBUSK, 1987. State of the art utilization of aquatic plants in water pollution control. *Wat. Sci. Tech.*, 19, 61-79.
- ROY B. et D. BOUYSSOU, 1993. Aide multicritère à la décision : méthodes et cas. ÉCONOMICA, Paris, France, 695 p.
- SCHIEMER F. et M. PROSSER, 1976. Distribution and biomass of submerged macrophytes in Neuseedersee. *Aquat. Bot.*, 2, 289-307.
- SIMBERLOFF D., 1996. Impacts of introduced species in the United States. *Consequences*, 2, 8-21.
- SINKALA T., MWASE E.T. et M. MWALA, 2002. Control of aquatic weeds through pollutant reduction and weed utilization: A weed management approach in the Lower Kafue River of Zambia. *Phys. Chem. Earth*, 27, 983-991.
- SKORUPKA C.N., 1998. Absorption d'azote par une communauté de macrophytes flottants libres dans des lacs de la plaine d'inondation du fleuve Parana (Argentine). Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Montréal (UQAM), Montréal, Québec, Canada, 77 p.
- TOIVONEN H. et T. LAPPALAINEN, 1980. Ecology and production of aquatic macrophytes in the oligotrophic, mesohumic lake Suomun Jorvi, eastern Finland. *Ann. Bot. Fenn.*, 17, 69-85.
- TRIPATHI B.D., SRIVASTAVA J. et K. MISRA, 1991. Nitrogen and phosphorus removal capacity of four chosen aquatic macrophytes in tropical freshwater ponds. *Environ. Conserv.*, 18, 143-147.
- TWONGO T., 1996. Growing impact of water hyacinth on nearshore environments on Lakes Victoria and Kyoga (East Africa). Dans : The Limnology, Climatology, and Paleoclimatology of the East African Lakes. JOHNSON T.C. et E.O. ODADA (éditeurs). Gordon and Breach Publishers, Amsterdam, The Netherlands, 633-642.
- VAN ZON J.C.J., 1982. Aquatic weeds. Dans : Biology and Ecology of Weeds, HOLZER W. et NUMATA M. (éditeurs), Dr W. JUNK Publishers, The Hague, The Netherlands, 449-455.
- XIE Y. et D. YU, 2003. The significance of lateral roots in phosphorus (P) acquisition of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Aquat. Bot.*, 75, 311-321.
- ZAYED A., GOWTHAMAN S. et N. TERRY, 1998. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed. *J. Environ. Qual.*, 27, 715-721.

ABRÉVIATIONS

DCO	Demande chimique en oxygène
FAO	Organisation Mondiale de l'Alimentation
ha	Hectare
PF	Poids frais
MS	Matière sèche