

Végétation macrophytique, environnement et qualité d'eau dans le bassin versant du Bocq (Belgique, Wallonie)

Macrophytic vegetation, environment and water quality in the Bocq catchment (Belgium, Wallonia)

Guy Bouxin

Volume 26, numéro 1, 2013

Reçu le 13 janvier 2011, accepté le 24 octobre 2012

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1014915ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1014915ar>

[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

Bouxin, G. (2013). Végétation macrophytique, environnement et qualité d'eau dans le bassin versant du Bocq (Belgique, Wallonie). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 26(1), 1–19. <https://doi.org/10.7202/1014915ar>

Résumé de l'article

La végétation aquatique et amphibie de la rivière Bocq et de ses principaux affluents (appelés ruisseau de Crupet, ruisseau de Leignon, Petit Bocq, Ri d'Veisse et Ri des Vaux), dans un bassin versant du sud de la Belgique, a été étudiée de 2009 à 2011. Cinquante sections de 100 m de long ont été sélectionnées. Dans chaque section, la végétation a été décrite, comprenant les anthophytes, ptéridophytes, bryophytes, algues filamenteuses et cyanobactéries; plusieurs paramètres mésologiques des lits mineur et majeur et sept paramètres chimiques ont été enregistrés. L'analyse statistique des données a été faite au moyen de l'analyse en composantes principales et de l'analyse des correspondances. Les ensembles de tableaux juxtaposés de données floristiques et mésologiques ont été transformés en tableaux disjonctifs complets et analysés au moyen de l'analyse factorielle multiple. L'environnement naturel est responsable d'une partie importante de la variation de la végétation, mais il y a aussi un impact significatif de l'occupation humaine et de l'agriculture dans le lit majeur. Certaines espèces sont clairement des indicatrices des caractéristiques géomorphologiques du lit mineur ou de l'éclaircissement, mais d'autres sont aussi liées aux rejets d'eaux usées domestiques ou traduisent l'incidence de fermes et de l'élevage bovin. Six groupements végétaux sont décrits et mis en relation avec l'environnement et la chimie de l'eau. Les algues et cyanobactéries entrent dans plusieurs combinaisons caractéristiques d'espèces. L'utilisation des anthophytes, bryophytes, algues et cyanobactéries comme bioindicateurs de qualité d'eau est discutée.



VÉGÉTATION MACROPHYTIQUE, ENVIRONNEMENT ET QUALITÉ D'EAU DANS LE BASSIN VERSANT DU BOCQ (BELGIQUE, WALLONIE)

Macrophytic vegetation, environment and water quality in the Bocq catchment (Belgium, Wallonia)

GUY BOUXIN*

*Fondation Gouverneur René CLOSE, place Saint-Aubain, 25000 Namur, Belgique

Reçu le 13 janvier 2011, accepté le 24 octobre 2012

RÉSUMÉ

La végétation aquatique et amphibie de la rivière Bocq et de ses principaux affluents (appelés ruisseau de Crupet, ruisseau de Leignon, Petit Bocq, Ri d'Vesse et Ri des Vaux), dans un bassin versant du sud de la Belgique, a été étudiée de 2009 à 2011. Cinquante sections de 100 m de long ont été sélectionnées. Dans chaque section, la végétation a été décrite, comprenant les anthophytes, ptéridophytes, bryophytes, algues filamenteuses et cyanobactéries; plusieurs paramètres mésologiques des lits mineur et majeur et sept paramètres chimiques ont été enregistrés. L'analyse statistique des données a été faite au moyen de l'analyse en composantes principales et de l'analyse des correspondances. Les ensembles de tableaux juxtaposés de données floristiques et mésologiques ont été transformés en tableaux disjonctifs complets et analysés au

moyen de l'analyse factorielle multiple. L'environnement naturel est responsable d'une partie importante de la variation de la végétation, mais il y a aussi un impact significatif de l'occupation humaine et de l'agriculture dans le lit majeur. Certaines espèces sont clairement des indicatrices des caractéristiques géomorphologiques du lit mineur ou de l'éclairement, mais d'autres sont aussi liées aux rejets d'eaux usées domestiques ou traduisent l'incidence de fermes et de l'élevage bovin. Six groupements végétaux sont décrits et mis en relation avec l'environnement et la chimie de l'eau. Les algues et cyanobactéries entrent dans plusieurs combinaisons caractéristiques d'espèces. L'utilisation des anthophytes, bryophytes, algues et cyanobactéries comme bioindicateurs de qualité d'eau est discutée.

Mots clés : *Algues; Analyses multivariées; Bocq; Bryophytes; Cyanobactéries; Macrophytes; Qualité d'eau.*

NOMENCLATURE

La nomenclature suit :

- pour les plantes vasculaires : LAMBINON *et al.* (2004);
- pour les bryophytes : SOTIAUX *et al.* (2007);
- pour les algues et cyanobactéries : CHIASSON *et al.* (2007), ELORANTA *et al.* (2011), ENTWISLE *et al.* (2009), JOHN *et al.* (2011) et KOMÁREK et ANAGNOSTIDIS (2005).

SUMMARY

The water and riparian vegetation of the river Bocq and its main tributaries (called Crupet stream, Leignon stream, Petit Bocq, Ri d'Veesse and Ri des Vaux) from a catchment in the south of Belgium was studied from 2009 to 2011. Fifty 100 m long sections were selected. In each section, the vegetation was described, including the anthophytes, pteridophytes, bryophytes, filamentous algae and cyanobacteria. Moreover, various mesological parameters of the stream channel and floodplain and seven chemical parameters were recorded. The statistical data analysis was conducted by means of principal component analysis and correspondence analysis. The dataset of juxtaposed floristic and mesologic tables was transformed into complete disjunctive tables and analysed using multiple factor analysis. The natural environment is responsible for an important portion of the variation in the vegetation but there is also a significant impact of human occupation and farming in the floodplain. Some species are clearly indicators of the geomorphological characteristics of the stream bed or available light, but others are also related to the discharge of domestic waste water or reflect the incidence of farms and cattle breeding. Six plant communities are described and linked to the environment and water chemistry. Algae and cyanobacteria enter several characteristic species combinations. The use of the anthophytes, bryophytes, algae and cyanobacteria as bioindicators of water quality is discussed.

Keywords: *Algae; Bocq; Bryophytes; Cyanobacteria; Macrophytes; Multivariate analyses; Water quality.*

1. INTRODUCTION

Les techniques d'étude de la végétation des ruisseaux et la mise en relation des groupements végétaux décrits avec leurs caractéristiques environnementales, en général, et les paramètres physico-chimiques de l'eau, en particulier, sont

diverses et dépendent en grande partie des objectifs choisis. Ces techniques ont en commun la réalisation de relevés de végétation, c'est-à-dire de listes d'espèces, auxquelles est souvent associé un coefficient d'abondance, dressées dans des sites bien délimités, souvent retenus pour leur homogénéité physiologique. La végétation aquatique, celle des berges ou encore celle de la plaine alluviale, sont généralement décrites séparément. Les premières études se basaient sur les anthophytes et ptéridophytes mais il s'avère actuellement indispensable d'intégrer d'autres groupes d'organismes comme cela est recommandé dans la détermination de l'indice biologique macrophytique en rivières ou IBMR (HAURY *et al.*, 2006) ou comme cela fut pratiqué par DESCY (1973), EMPAIN (1973), FABRI (1977), HAURY *et al.* (1996, 1998), HAURY et MULLER (1991), PORTER *et al.* (2008), VANDERPOORTEN (1999) et VIS *et al.* (2008).

Les algues benthiques et les cyanobactéries ont été retenues en vue de définir les types d'eaux courantes en Allemagne; leur utilisation est considérée comme un prérequis en vue d'une gestion en accord avec la Directive-Cadre sur l'Eau de l'Union Européenne (FOERSTER *et al.*, 2004). L'utilisation des macrophytes et du phytobenthos pour arriver à une classification écologique des rivières d'Allemagne répond aussi à cette Directive-Cadre (SCHAUMBURG *et al.*, 2004). Il s'avère donc indispensable de réunir, dans un même relevé, une diversité aussi grande que possible d'organismes autotrophes. La collecte de tous ces organismes implique que l'on se base sur des relevés plus grands que ceux utilisés dans l'école sigmatiste (ROYER, 2009) puisque tous n'occupent pas nécessairement les mêmes niches écologiques : hydrophytes fixés dans un fond meuble, bryophytes, algues et cyanobactéries benthiques sur de gros blocs situés juste à côté d'une zone calme, etc., tout cela pour une même qualité d'eau. Les relevés doivent donc couvrir des sections de rivières de plusieurs dizaines de mètres de long.

La présente étude de la végétation aquatique d'un ruisseau fait partie d'une série de travaux privilégiant l'approche par bassin versant (BOUXIN, 1987; 1991; 2011a et b).

L'objectif de cette étude est :

- de décrire la végétation aquatique, incluant les anthophytes, ptéridophytes, bryophytes, algues et cyanobactéries d'un ruisseau et de ses principaux affluents et de la mettre en relation avec la qualité de l'eau et l'environnement, comme cela a été fait dans un autre bassin versant de Belgique (BOUXIN, 2011a);
- d'évaluer dans quelle mesure les diverses espèces sont des bioindicatrices de la qualité de l'eau;
- d'évaluer l'apport respectif des techniques utilisées dans l'accomplissement de ces objectifs.

Une publication complémentaire à celle-ci a été réalisée, avec calcul de l'indice IBMR et une première description de groupements végétaux (BOUXIN, 2011b).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le Bocq est une rivière de 45 kilomètres de long, qui coule dans le Condroz, région naturelle de Belgique située au sud du sillon Sambre et Meuse (Figure 1). L'agriculture y occupe une place importante, elle se consacre surtout à l'élevage des bovidés et aux cultures céréalières. Le Bocq prend sa source à une altitude de 305 mètres. Il se jette dans la Meuse à Yvoir, à 20 kilomètres au sud de Namur, à une altitude de 90 mètres. La pente moyenne est de 0,48 %. Le relief est caractérisé par une alternance de bombements appelés tiges, allongés dans le sens général sud-sud-ouest nord-nord-est, et de dépressions appelées chavées. En général, les chavées correspondent aux synclinaux du Carboniférien calcaire et les tiges aux anticlinaux

du Dévonien supérieur gréseux. Le ruisseau et ses affluents traversent plusieurs villages et petites villes et reçoivent des eaux usées d'origine domestique ou agricole, ainsi qu'en hiver, les eaux salées du déneigement.

L'étude se base sur cinquante relevés de végétation décrits entre les années 2009 et 2011. La description de l'environnement concerne les lits mineur et majeur. Des analyses chimiques de l'eau ont été réalisées dans tous les sites.

2.1 Localisation des relevés

Les relevés de 100 mètres de long ont été localisés avec précision au moyen d'un GPS et leur position indiquée sur une carte (Figure 1) : 27 relevés ont été décrits le long du Bocq (notés B1 à B27), six le long du ruisseau de Crupet (C1 à C6), cinq le long du ruisseau de Leignon (L1 à L5), quatre le long du Petit Bocq (PB1 à PB4), sept le long du Ri d'Vesse (V1 à V7) et un pour le Ri des Vaux (So). Ils ont été placés de manière à

LE BOCQ ET SES PRINCIPAUX AFFLUENTS THE BOCQ RIVER AND ITS MAIN TRIBUTARIES

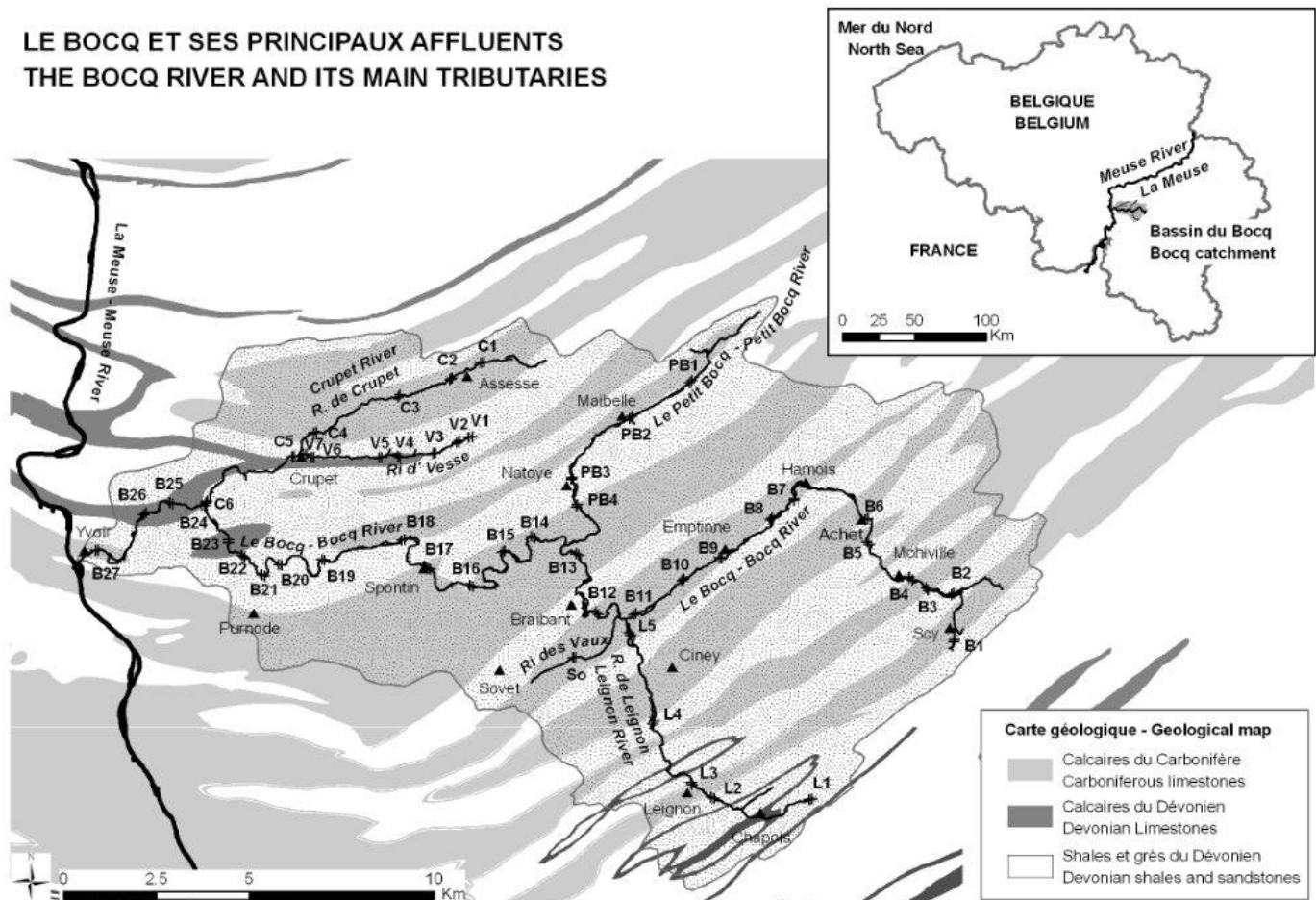


Figure 1. Le Bocq, ses principaux affluents (Crupet, Leignon, Petit Bocq, Ri d'Vesse et Ri des Vaux), villages, emplacement des relevés (B1 à B27, C1 à C6, L1 à L5, PB1 à PB4, V1 à V7, So) et géologie.

The Bocq River, its main tributaries (Crupet River, Leignon River, Petit Bocq River, Ri d'Vesse and Ri des Vaux), villages, location of the sampling sites (B1 to B27, C1 to C6, L1 to L5, PB1 to PB4, V1 to V7, So) and geology.

intégrer au mieux la diversité locale tout en gardant une bonne homogénéité physionomique. Les relevés ont été répartis régulièrement le long du cours, en évitant les sites longeant des propriétés privées à la végétation rivulaire artificialisée. Nous avons recherché à la fois des sites situés à proximité des villages et grosses fermes et des sites à l'écart des habitations. Une telle technique permet de décrire plusieurs relevés par jour.

2.2 Les analyses d'eau

Des analyses physico-chimiques, portant sur divers paramètres de l'azote et du phosphore, sur les principaux anions, la dureté, la conductivité, le pH, l'oxygène dissous, le carbone organique dissous, sur la température, sont réalisées chaque mois dans toute la Wallonie par l'Institut Scientifique de Service Public et sont consultables sur la base de données Aquaphyc du Service Public de Wallonie (SPW DGO3, <http://aquaphyc.environnement.wallonie.be/login.do>). Les données sont complètes pour la station d'Yvoir et partielles pour celles d'Emptinne, Braibant et Purnode.

En plus de ces données, plusieurs paramètres ont été déterminés sur le terrain dans chaque relevé, une série pendant la même période calme en août 2009 dans 37 sections, la seconde en octobre 2010 dans les mêmes sections et une complémentaire dans les 27 sections du Bocq en août 2011, au moyen d'un laboratoire compact AquaMerck® (référence 111151) : par colorimétrie pour l'ammonium, les nitrites, les nitrates, les orthophosphates et le pH, par volumétrie pour la concentration en oxygène (pourcentage de saturation calculé en fonction de la température) et la dureté totale (exprimée en degrés allemands, $1\text{ }^\circ\text{d} = 17,8\text{ mg CaCO}_3$). Ces données sont ponctuelles et certaines sont susceptibles de fortes variations temporelles comme c'est bien connu pour la concentration en oxygène (VILLENEUVE *et al.*, 2006).

2.3 Les relevés environnementaux

Pour décrire l'environnement de chaque relevé, divers paramètres ont été enregistrés (suivant DUPONT, 1998 et HAUER et LAMBERTI, 1996). Ils sont rassemblés dans le tableau 1.

2.4 Les relevés floristiques

Dans chaque relevé, la liste des anthophytes, ptéridophytes et bryophytes, aisément reconnaissables *de visu*, du lit mineur, c'est-à-dire entre les deux berges, est établie sur le terrain.

Le lit mineur est parcouru. Des bryophytes sont récoltées dans le lit mineur et sur les berges, puis séchées avant

identification ultérieure. Des algues filamenteuses benthiques visibles à l'œil nu sont aussi récoltées et examinées rapidement au microscope, souvent photographiées et parfois conservées dans du formol pour vérification ultérieure. Les gros blocs sont examinés attentivement pour découvrir les algues filamenteuses de petite taille et des cailloux sont récoltés, puis grattés juste avant l'observation au microscope pour l'examen d'espèces benthiques. Dans la mesure du possible, les algues filamenteuses et les cyanobactéries sont identifiées au niveau spécifique.

L'abondance des espèces est estimée visuellement et traduite en un coefficient d'abondance-dominance comme dans les relevés de l'école sigmatiste (ROYER, 2009), suivant l'échelle habituelle :

- + : Espèce peu abondante, à recouvrement très faible;
- 1 : Recouvrement de l'espèce inférieur à 5 %;
- 2 : Recouvrement de l'espèce compris entre 5 et 25 % de la surface totale;
- 3 : Recouvrement de l'espèce compris entre 25 et 50 % de la surface totale;
- 4 : Recouvrement de l'espèce compris entre 50 et 75 % de la surface totale;
- 5 : Recouvrement de l'espèce compris entre 75 et 100 % de la surface totale.

Il s'agit toujours d'une estimation visuelle.

Pour la plupart des algues et cyanobactéries, seule la présence est notée car la biomasse est faible. Seuls les genres *Vaucheria* formant des tapis verts (parfois appelés « blanket weed ») et *Melosira* formant des masses brunâtres bien visibles sur le fond de l'eau, reçoivent un coefficient d'abondance.

Chaque site a été visité plusieurs fois, en période de bas niveau et lorsque l'eau était suffisamment transparente, au moins deux fois par année pour les anthophytes et les bryophytes, une fois au printemps et une fois en été. Pour certaines algues et cyanobactéries, des passages ponctuels complémentaires ont été nécessaires. Toute espèce vue au moins une fois a été intégrée dans le tableau de relevés; en effet, en un même site, les individus de *Batrachospermum sp.*, par exemple, se développent de manière irrégulière d'une année à l'autre, en fonction du débit et de la transparence de l'eau.

2.5 Les tableaux de relevés

Quatre tableaux sont constitués, un premier pour les anthophytes et ptéridophytes, un second pour les bryophytes, un troisième pour les algues et cyanobactéries et un quatrième pour les données environnementales.

Tableau 1. Liste des paramètres environnementaux avec leurs unités et les abréviations utilisées dans les figures 6 et 7.
Table 1. List of environmental parameters with their units and abbreviations used in figures 6 and 7.

Variabes environnementales - Environmental variables	Abréviations - Abbreviations	Unités ou variables - Unities or variables
Altitude- Elevation		mètres - meters
Types de vallée - Kinds of valley :		
- Vallée en V - V valley	VV	0-1
- Colline d'un côté - Hill on one side	\--	0-1
- Collines des deux côtés - Hills on both sides	\- /	0-1
- Vallée plane - Plane valley	Vp-Pv	0-1
Ordre - Order		1-2-3
Largeur de la plaine alluviale - Width of the floodplain		mètres - meters
Pente générale du ruisseau - General slope of the stream		%
Lithologie - Lithology :		
- Grès et shales - Sandstone and shales		0-1
- Calcaire - Limestone		0-1
Sinuosité - Sinuosity :		
- Droit - Straight	Dr-St	0-1
- Sinueux - Sinuose	Si	0-1
- Méandres - Meanders		0-1
Éclaircissement - Available light	Ec-Li	%
Proportion du lit bordé de - Proportion of the bed bordered with :		
- Forêt - Forest		%
- Ripisylve - Woody bank		%
- Champs ou pâtures - Fields or pastures	Cp-Fp	%
- Conifères - Conifers		%
- Ligne d'arbres - Tree line		%
- Site urbanisé - Urbanised site	Ur	%
Largeur maximale du lit mineur - Maximal width of the bed	Ll-Bw	mètres - meters
Profondeur maximale de l'eau - water maximal depth		décimètres - decimeters
Type de lit - Kind of bed :		
- Plan - Plane		0-1
- Cuvettes et seuils - Basins and thresholds	Cs-Bt	0-1
Encaissement du lit mineur - Embankment of the bed :		
- 0 - 0,2 m - 0 - 0.2 m	E0.2	%
- 21 - 50 cm - 0.21 - 0.5 m	E0.2-0.5	%
- 51 - 100 cm - 0.51 - 1 m	E0.5-1	%
- 101 - 200 cm - 0.101 - 2 m	E1-2	%
- > 2 m		%
Pente de berge - Bank slope :		
- < 30 %		%
- 31 - 60 %	b31-60°	%
- > 60 %	b>60°	%

Tableau 1. Liste des paramètres environnementaux avec leurs unités et les abréviations utilisées dans les figures 6 et 7 (suite).
Table 1. List of environmental parameters with their units and abbreviations used in figures 6 and 7 (cont'd).

Variables environnementales - <i>Environmental variables</i>	Abréviations - <i>Abbreviations</i>	Unités ou variables - <i>Unities or variables</i>
Substrat - <i>Substrate</i> :		
- Substrat fin, meuble - <i>Fine substrate, running</i>		%
- Argile, solide - <i>Clay, stable</i>		%
- Sable et graviers < 2 cm - <i>Sand and gravel < 2 cml</i>		%
- Cailloux < 20 cm - <i>Cobbles < 20 cm</i>		%
- Blocs (≥ 20 cm) et dalle - <i>Boulders and slab</i>		%
Faciès lentique - <i>Lentic facies</i> :		
- Mouille - <i>Basin</i>		0-1
- Plat lent - <i>Slow plane</i>		0-1
- Avec courant très lent - <i>With very slow flow</i>	Ctl- <i>Vsf</i>	0-1
- Avec courant lent - <i>With slow flow</i>		0-1
- Avec courant modéré - <i>With moderate flow</i>		0-1
Faciès lotique - <i>Lotic facies</i> :		
- Plat courant - <i>Plane gradient</i>	Flo- <i>Lof</i>	%
- Radier - <i>Run</i>	Pc- <i>Pg</i>	0-1
- Cascatelles - <i>Small waterfalls</i>	Ra- <i>Ru</i>	0-1
- Courant rapide - <i>Fast flow</i>	Ca- <i>Wf</i>	0-1
- Courant très rapide - <i>Very fast flow</i>	Cr- <i>Rf</i>	0-1
	Ctr- <i>Vff</i>	0-1
Eau claire - <i>Clear water</i>	Ecl- <i>Chw</i>	0-1
Eau trouble - <i>Truble water</i>		0-1
Piétinement du lit mineur par le bétail - <i>Cattle trampling of the bed</i>		%
Berge clôturée - <i>Enclosures along the bank</i>		%
Fermes à proximité du ruisseau - <i>Farms near the stream</i>	Fer- <i>Far</i>	0-1
Constructions à proximité du ruisseau- <i>Buildings near the stream</i>		0-1
Jardins - <i>Gardens</i>		0-1
Eaux usées - <i>Waste waters</i>		0-1
Bétail dans la plaine alluviale - <i>Cattle in the floodplain</i>	Bé- <i>Ca</i>	0-1

Les analyses chimiques mensuelles de la base de données Aquaphyc ne portent que sur quatre sites et ne peuvent être couplées aux autres tableaux. Il en va de même pour les analyses de terrain qui n'ont été réalisées qu'une seule fois par an et chaque fois sur une partie des relevés. Ces données sont donc complémentaires à celles des autres tableaux.

2.6 Analyses multivariées et adaptation des tableaux

Les tableaux des données environnementales, comprenant des données quantitatives (mesures, dénombrements) et qualitatives sont analysés directement par l'analyse en composantes principales (ACP) d'une matrice de corrélation.

Les variables représentées dans un seul relevé sont éliminées de l'analyse.

Les tableaux floristiques ne peuvent être traités directement par une analyse multivariée car ils comprennent des données non numériques (+) et une très forte proportion de cellules vides (notées « 0 »), et cela perturbe fortement l'analyse. L'analyse des correspondances (AC), pourtant habituellement utilisée pour analyser des données floristiques, est adaptée à des tableaux de présences ou de fréquences, mais certainement pas à des données d'abondance. Il importe donc de transformer au préalable les données sous forme de tableaux disjonctifs complets et c'est la manière suivante qui a fourni les résultats les plus équilibrés, avec une bonne dispersion d'un grand nombre

d'espèces ou de relevés dans les plans factoriels. À chaque étape de la transformation, deux lignes sont créées comme suit :

- la première étape correspond aux présences, quels que soient les coefficients; une première ligne comprend des « 1 » pour les présences et « 0 » pour les absences; la seconde ligne comprend des « 1 » pour les absences et des « 0 » pour les présences;
- la seconde étape correspond aux abondances supérieures à « + », la première ligne correspond aux abondances « 1, 2, 3, 4 et 5 » notées « 1 » et les autres sont notés « 0 »; la seconde ligne correspond aux abondances « 0, et + » notées « 1 » et les autres notées « 0 »;
- la troisième étape correspond aux abondances supérieures à 1, la première ligne correspond aux abondances « 2, 3, 4 et 5 » notées « 1 » et les autres sont notés « 0 »; la seconde ligne correspond aux abondances « 0, + et 1 » notées « 1 » et les autres notées « 0 »;

et ainsi de suite jusqu'à 5. En pratique, en fonction du nombre de relevés, la procédure est simplifiée en groupant par exemple « + » et « 1 », « 2 » et « 3 », « 4 » et « 5 », afin de limiter le nombre de lignes avec une ou un très petit nombre de présences. Dans cette procédure, la somme est identique sur chaque colonne.

Cette technique évite l'écueil de donner une importance démesurée à des espèces rares vivant dans des sites peu diversifiés. L'AC est adaptée à de tels tableaux. Celle-ci a aussi été utilisée par NGUETSOP *et al.* (2009) dans l'étude des assemblages d'algues de sites marécageux de l'Ouest Cameroun.

Une technique par permutation, construite sur les contributions relatives, permet de déterminer le nombre d'axes significatifs ainsi que les relevés et variables présentant aussi des contributions relatives significatives, au niveau $\alpha = 0,05$ (MANLY, 1997). Chacun des quatre tableaux a ainsi été analysé sur base de 10 000 permutations.

Pour analyser un ensemble des tableaux très différents comme les trois tableaux floristiques ou les tableaux floristiques réunis au tableau environnemental, l'analyse factorielle multiple s'est imposée. L'analyse factorielle multiple ou AFMULT est une généralisation des techniques de couplage de tableaux. Elle est une des méthodes les plus pratiques parmi les méthodes d'ordination simultanée de plusieurs tableaux (CHESSEL, 1997). L'AFMULT, pour uniformiser le rôle des tableaux dans l'analyse simultanée, consiste à ramener à une échelle commune les inerties projetées sur le premier axe de l'analyse de chaque tableau. L'analyse factorielle multiple est construite sur la technique d'analyse en composantes principales ou d'analyse des correspondances. Elle nécessite une PCA (ou une CA) du tableau formé par la réunion des tableaux de départ et

une PCA (ou une CA) pour chacun des tableaux séparés. Elle a été utilisée dans des études de cours d'eau, notamment par HAURY et BAGLINIÈRE (1990) et HAURY *et al.* (1998).

Le caractère significatif des lignes et colonnes du tableau floristique est calculé à partir de CA.

Une technique de classification hiérarchique descendante avec réallocations (BERTHET *et al.*, 1976), construite sur base des coordonnées des relevés sur les axes significatifs de l'AFMULT des données floristiques, a été utilisée pour définir des groupements végétaux. La classification a été ensuite confrontée à un classement des mêmes relevés grâce à la technique d'agrégation autour de centres mobiles (ROUX, 1985). Chaque groupement est défini par sa combinaison caractéristique d'espèces, comme cela est recommandé par ROYER (2009).

Tous les logiciels sont personnels et rédigés en ACCESS BASIC, au départ d'algorithmes publiés (FOUCART, 1982 et ROUX, 1985) ou fournis par les auteurs (BERTHET, communication personnelle). Ils sont intégrés dans une base de données et régulièrement actualisés. Ces programmes sont disponibles sur demande.

3. RÉSULTATS

Les tableaux de relevés, la liste des espèces, les noms et coordonnées des 50 sites et les résultats des analyses multivariées sont consultables sur le site :

<http://users.skynet.be/Bouxin.Guy/Bocq/Annexes.htm>

3.1 Physico-chimie de l'eau

Les données de la station d'Yvoir indiquent que la température (Figure 2) de l'eau descend jusqu'à 0,7 °C pendant les hivers les plus froids (en 1996), mais s'élève en été jusqu'à 27,1 °C (en 1998), avec une moyenne annuelle assez stable de 10 °C. D'autres paramètres sont naturellement très variables comme le débit (moyenne annuelle fluctuant entre 1,076 et 3,568 m³•s⁻¹) ou les matières en suspension (Figure 2, moyenne entre 9 et 46 mg•L⁻¹ et des extrêmes compris entre 1 et 476 mg•L⁻¹). Plusieurs paramètres varient dans une moindre mesure depuis 1996 comme le pH (entre 7,7 et 8,58 et des moyennes annuelles proches de 8,3), la conductivité (entre 469 et 532 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ de moyenne annuelle mais des mesures mensuelles extrêmes de 374 et 643 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), la dureté totale

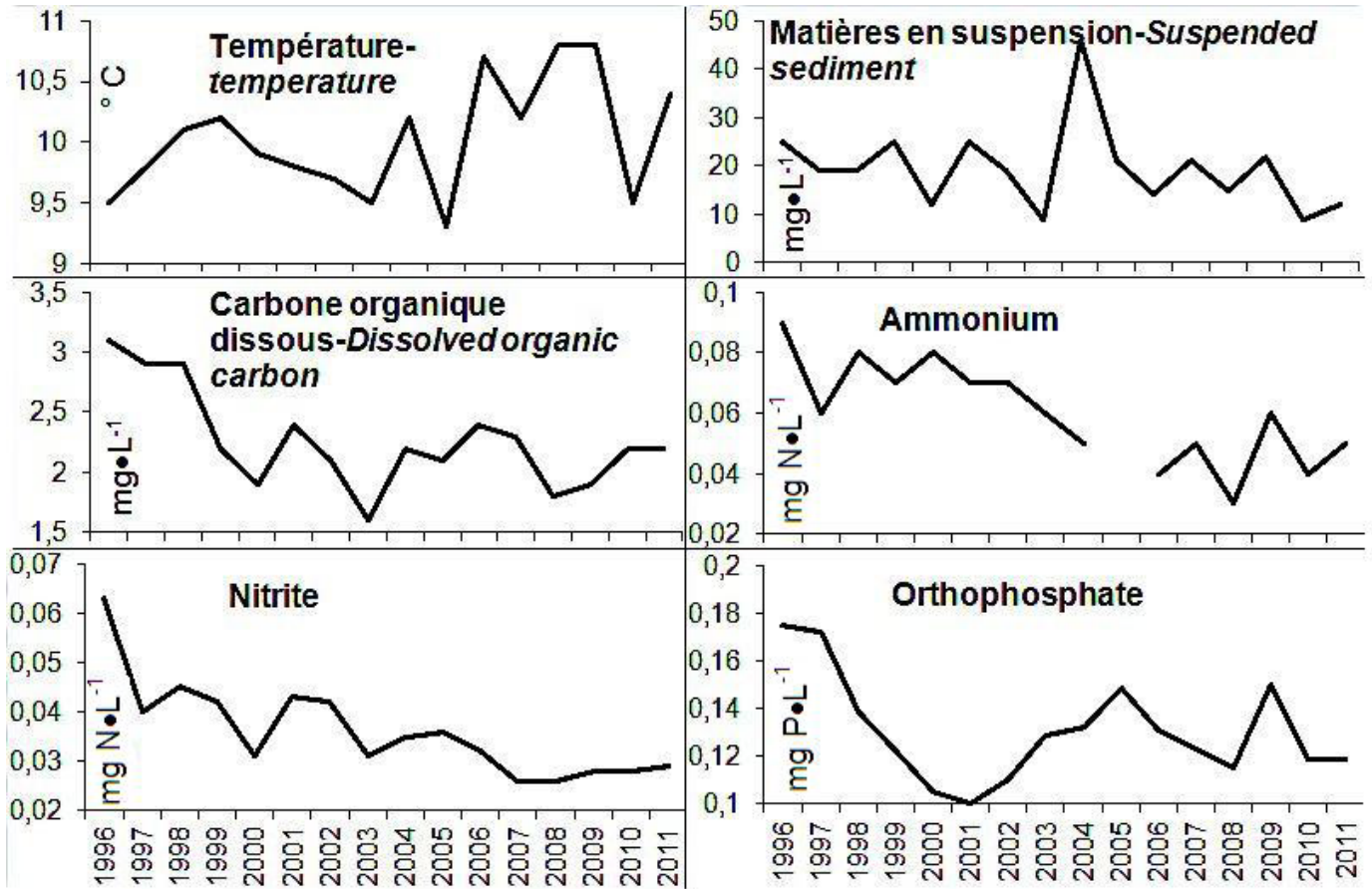


Figure 2. Évolution de six paramètres environnementaux et chimiques entre 1996 et 2011, à Yvoir.
Evolution of six environmental and chemical parameters between 1996 and 2011, at Yvoir.

(moyennes annuelles variant de 23,9 à 27,7 °f) (1 °f = 0,560 °d), les concentrations en calcium (moyennes annuelles variant de 75,7 à 87,2 mg·L⁻¹), magnésium (moyennes annuelles variant de 7,7 à 12,7 mg·L⁻¹); la saturation en oxygène (moyennes annuelles d'au moins 97 %), les nitrates (moyennes annuelles variant de 5,31 à 6,03 mg N·L⁻¹), sulfates (moyennes annuelles variant de 18,1 à 31,7 mg·L⁻¹) et chlorures (moyennes annuelles variant de 23 à 35 mg·L⁻¹).

Quatre paramètres, malgré de très fortes variations mensuelles, montrent une tendance générale à la diminution dans leurs valeurs moyennes, comme le carbone organique dissous, l'ammonium, les nitrites et les orthophosphates solubles (Figure 2), ce qui est probablement le résultat des efforts faits en matière d'épuration des eaux.

En comparant l'évolution de quelques paramètres avec les données disponibles pour quatre stations depuis le cours moyen jusqu'à l'embouchure (Figure 3), on constate une nette diminution de l'azote ammoniacal et des nitrites depuis Emptinne jusqu'à Purnode, puis une stabilisation, mais une augmentation constante des orthophosphates solubles et des chlorures depuis Emptinne jusqu'à l'embouchure. Cela montre

que le Bocq supérieur et moyen est enrichi en azote, ce qui est attendu puisqu'il est principalement agricole, tandis que l'enrichissement en orthophosphate est constant vers l'aval, ce qui semble corrélé à l'augmentation de l'habitat.

Étant donné le caractère très variable des résultats des analyses de terrain, à la fois dans le temps pour un même site et dans l'espace, elles ne sont pas intégrées dans les analyses multivariées, mais elles sont prises en considération dans la description des groupements végétaux.

3.2 Analyse multiple des fichiers floristiques

Les fichiers anthophytes et bryophytes restent pratiquement inchangés d'une année à l'autre. Il n'en va pas de même du fichier algues et cyanobactéries qui montrent une variation annuelle dans la liste des espèces ainsi que dans la fréquence de certaines; ces changements sont probablement dus, en partie du moins, aux variations climatiques. Pour limiter les effets des fluctuations annuelles, les données des trois fichiers annuels ont été réunies, sauf celles de deux relevés modifiés par des

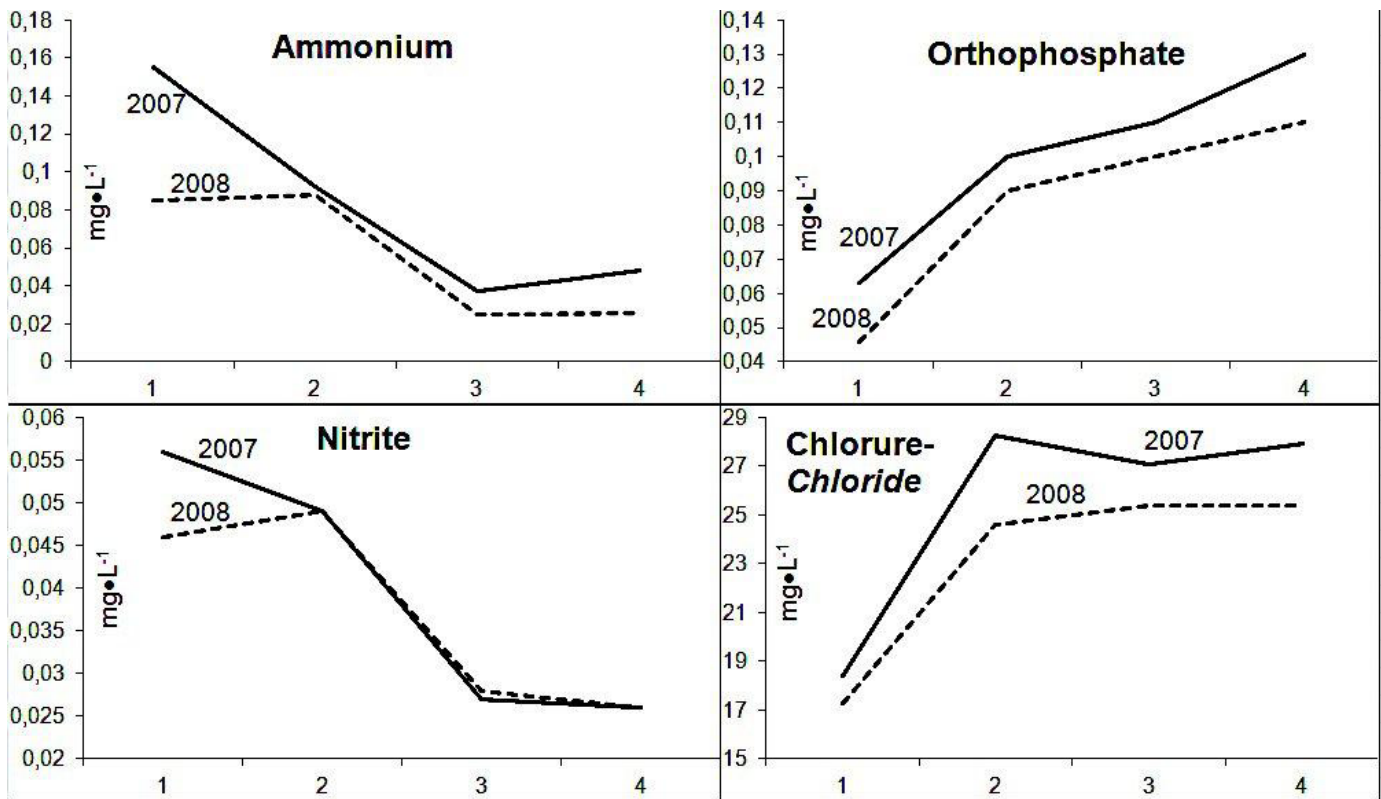


Figure 3. Évolution de quatre paramètres chimiques à Emptinne (1), Braibant (2), Purnode (3) et Yvoir (4), en 2007 et 2008.
Evolution of four chemical parameters between Emptinne (1), Braibant (2), Purnode (3) and Yvoir (4), in 2007 and 2008.

travaux dans le lit mineur à partir de 2010, pour lesquels seules les données les plus récentes ont été considérées.

Une analyse des correspondances du tableau disjonctif complet avec 10 000 permutations produit sept axes significatifs sur base des contributions relatives (CR). Les contributions relatives assez faibles des axes dans ce genre d'analyse résultent de la très grande diversité des tableaux et sont habituelles.

Ce sont les coordonnées des espèces et relevés, calculées par l'analyse factorielle multiple, qui fournissent la meilleure base à l'interprétation.

On distingue, dans le plan des axes un (CR = 9,334 %) et deux (CR = 7,697 %), dans la figure 4, en partant de la gauche et en suivant le sens des aiguilles d'une montre :

- un important ensemble d'espèces, comprenant des anthophytes, bryophytes, algues et cyanobactéries, nettement liées au cours inférieur du Bocq;
- *Cardamine amara*, qui occupe le lit ou la marge aussi bien de ruisselets que de ruisseaux;
- un ensemble lié au Ri d'Vesse, avec principalement des anthophytes;

- un ensemble lié au Ri des Vaux et aux relevés supérieurs du Bocq et du Leignon, avec uniquement des anthophytes;
- un ensemble lié à PB1, B3 et L3, ruisselets et petits ruisseaux situés en zone agricole et urbanisée, comprenant les quatre grands groupes d'organismes;
- et un ensemble important d'espèces des quatre groupes d'organismes, dans le cours supérieur et moyen du Bocq.

Dans le plan des axes 3 (CR = 6,009 %) et 4 (CR = 5,540 %), en suivant le même ordre, se trouvent (Figure 5) :

- un ensemble varié d'espèces associées, avec notamment trois qui sont abondantes : *Berula erecta*, *Helosciadium nodiflorum* et *Nasturtium officinale*, à la fois dans le Bocq supérieur et inférieur;
- un petit groupe d'espèces principalement autour de B1, avec *Sparganium erectum* très abondant sur la marge des petits ruisseaux;
- un groupe d'hydrophytes en B9, dont *Elodea canadensis* abondante;
- un ensemble d'espèces autour de B15 avec trois hydrophytes, avec notamment *Sparganium emersum* dans sa forme aquatique;
- et un ensemble d'espèces autour de B12, avec l'hydrophyte *Callitriche obtusangula* abondante.

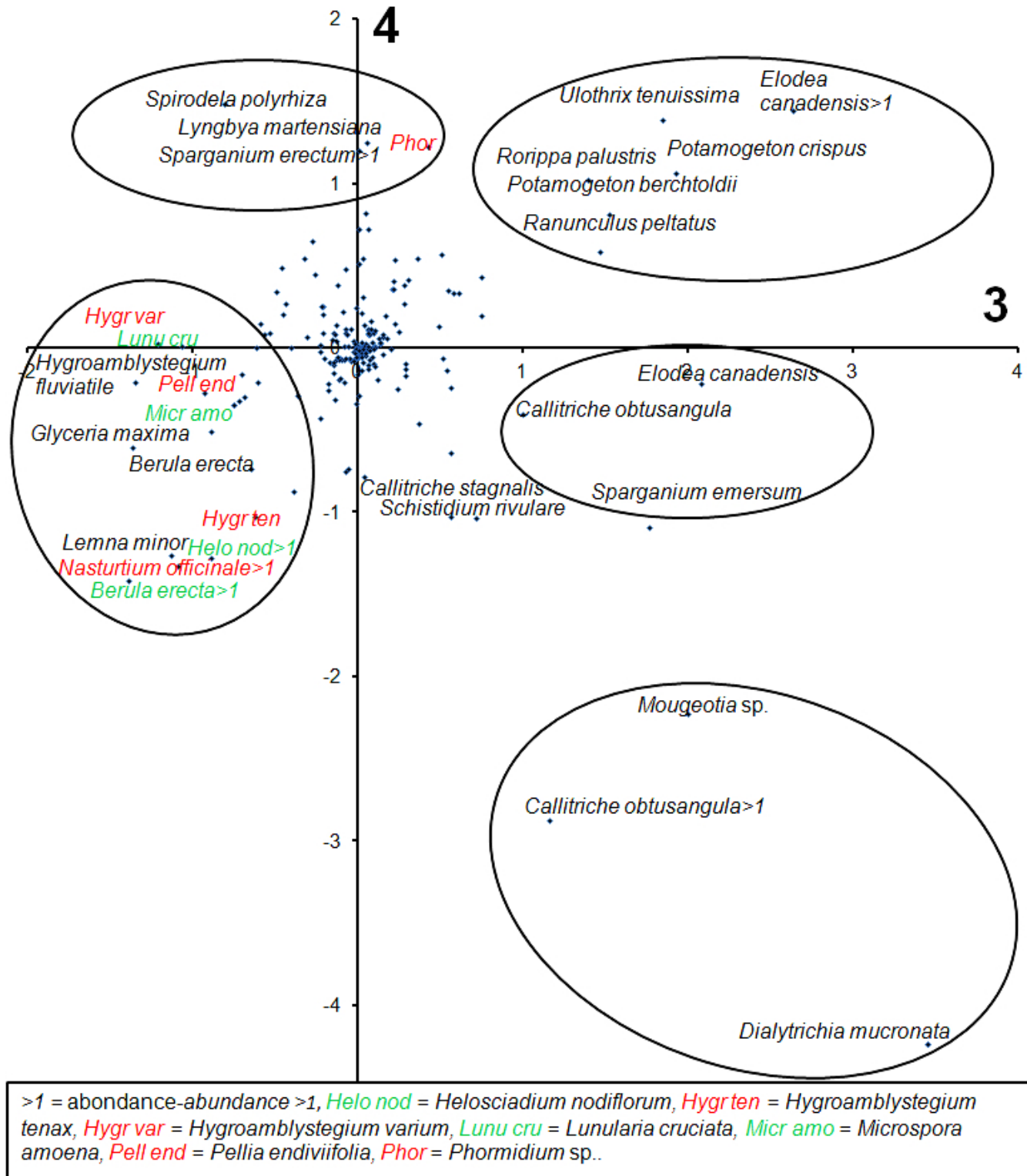


Figure 5. Analyse factorielle multiple des fichiers floristiques. Dispersion des espèces et des relevés dans le plan des axes trois et quatre. Multiple factor analysis of the floristic files. Dispersion of species and sampling points in the plane of axes three and four.

Les axes suivants ne mettent généralement plus en évidence que des espèces très localisées. L'incidence de l'arbre *Alnus glutinosa*, occupant aussi bien le lit mineur que la berge, n'apparaît que sur l'axe 6, pour autant que son couvert dépasse 25 %; plusieurs espèces y sont associées et semblent donc résistantes à un certain ombrage, comme *Glyceria maxima*, *Callitriche stagnalis*, *Pellia epiphylla*, *Helosciadium nodiflorum* abondante, *Scutellaria galericulata* et *Berula erecta* abondante.

Cette analyse conduit facilement à la définition de groupes socioécologiques qui demandent toutefois à être confortés par des observations répétées dans le temps et en d'autres lieux.

3.3 Analyse multiple des fichiers floristiques et environnementaux réunis

Dans le plan des axes 1 et 2 de l'analyse factorielle multiple basée sur l'analyse en composantes principales, avec respectivement des contributions relatives de 10,357 et 7,949 % (Figure 6), il y a cette fois des ensembles d'espèces (fort semblables à ceux de l'analyse des correspondances) associés à des facteurs mésologiques. En partant de l'axe 1 avec des coordonnées négatives et en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre, se trouvent :

- associées aux sections les plus profondes et les plus larges du Bocq, avec le lit mineur couvert principalement de blocs, les espèces suivantes : les anthophytes *Ranunculus fluitans* (hydrophyte) et *Scrophularia umbrosa* (hélophyte), les bryophytes *Cinclidotus riparius*, *Fissidens crassipes*, *Fontinalis antipyretica* et les algues *Cladophora glomerata* et *Lemanea fluviatilis*;
- plus particulièrement liées aux sites forestiers sur roches acides (shales, grès), les anthophytes *Cardamine amara* et *Chrysosplenium oppositifolium*;
- le long des ruisselets pentus, peu encaissés, aux cours droits, les anthophytes *Epilobium obscurum* et *Glyceria fluitans* et localement l'hépatique *Pellia epiphylla*;
- l'anthophyte *Sparganium erectum* sur le fond et la marge des ruisselets au cours lent, bordés de pâtures, situés dans les cours supérieurs, en milieu bien éclairé; en présence aussi de l'algue *Tribonema viride* et de la cyanobactérie *Geitlerinema amphibium*;
- enfin, dans la partie inférieure du graphe, un grand groupe d'espèces autour des paramètres « eaux usées », « jardins », « bâtiments » comme cela se marque fortement dans trois relevés du cours supérieur du Bocq, à Mohiville, Achet et Emptinne.

Il faut remarquer que l'éclairement du lit n'intervient pratiquement que sur le premier axe, les relevés du cours inférieur étant plus souvent bordés d'une ripisylve que ceux du cours supérieur agricole.

Dans le plan des axes 3 et 4, avec respectivement des contributions relatives de 7,081 et 4,904 %, (Figure 7), la moitié supérieure du graphe est occupée par un grand groupe d'espèces entre les paramètres « fermes », « habitations » et « eaux usées », certaines associées à des eaux lentes comme les anthophytes *Callitriche obtusangula* et *Lemna minor*, d'autres à des cours plus rapides comme les anthophytes *Callitriche platycarpa*, *Helosciadium nodiflorum*, *Nasturtium officinale* et *Scirpus sylvaticum*, les bryophytes *Hygroamblystegium tenax* et *Platyhypnidium riparioides*, les algues *Microspora amoena* et *Fragilaria sp.* Ce sont principalement deux relevés du cours supérieur du Bocq (B2 et B4) qui sont concernés. Dans la partie droite, il s'agit d'un groupe d'espèces d'hydrophytes (*Elodea canadensis*, *Potamogeton berchtoldii*, *P. crispus* et *Ranunculus peltatus* parmi les plus caractéristiques) et dans une moindre mesure de l'algue *Oedogonium capillare*, se développant dans les cours lents, en milieu calcaire, et au milieu des pâtures, en B9, B11 et B15. La partie inférieure du graphe comprend un groupe de cyanobactéries comme *Geitlerinema amphibium*, *Limnothrix sp.*, *Oscillatoria limosa*, *Phormidium autumnale*, *Pseudanabaena sp.*, les algues *Cladophora glomerata*, *Oedogonium sp.* et *Stigeoclonium tenue* et la bryophyte *Leptodictyum riparium*. Le lien partiel avec le pourcentage de berge clôturée montre que l'on se trouve au milieu d'un lit majeur densément pâturé, comme dans le ruisseau de Crupet ou en B1.

Il y a une assez bonne similitude entre les représentations des relevés des deux analyses, pour les quatre premiers axes, ce qui montre la robustesse des techniques ainsi utilisées.

Les axes suivants sont difficiles à interpréter à l'échelle de ce travail. Seul un plus grand nombre de relevés apporterait des précisions complémentaires.

3.4 Définition de groupements végétaux

Des groupements végétaux sont définis à partir des coordonnées des relevés sur les sept premiers axes. Six groupements sont décrits.

3.4.1 Groupement des ruisselets non pollués à *Galium palustre* et *Scirpus sylvaticus*

Six relevés : V1, V2, V3, V4, V6 et L1.

La combinaison caractéristique des espèces comprend : *Cardamine amara*, *Chrysosplenium oppositifolium*, *Epilobium obscurum*, *Galium palustre*, *Glyceria fluitans* et *Scirpus sylvaticus* (exclusive). Les bryophytes, algues et cyanobactéries sont peu représentées. *Platyhypnidium riparioides* et *Hygroamblystegium tenax* occupent les cailloux; *Pellia epiphylla* et *Schistidium rivulare*, peu fréquentes, ne sont observées que dans ce groupement.

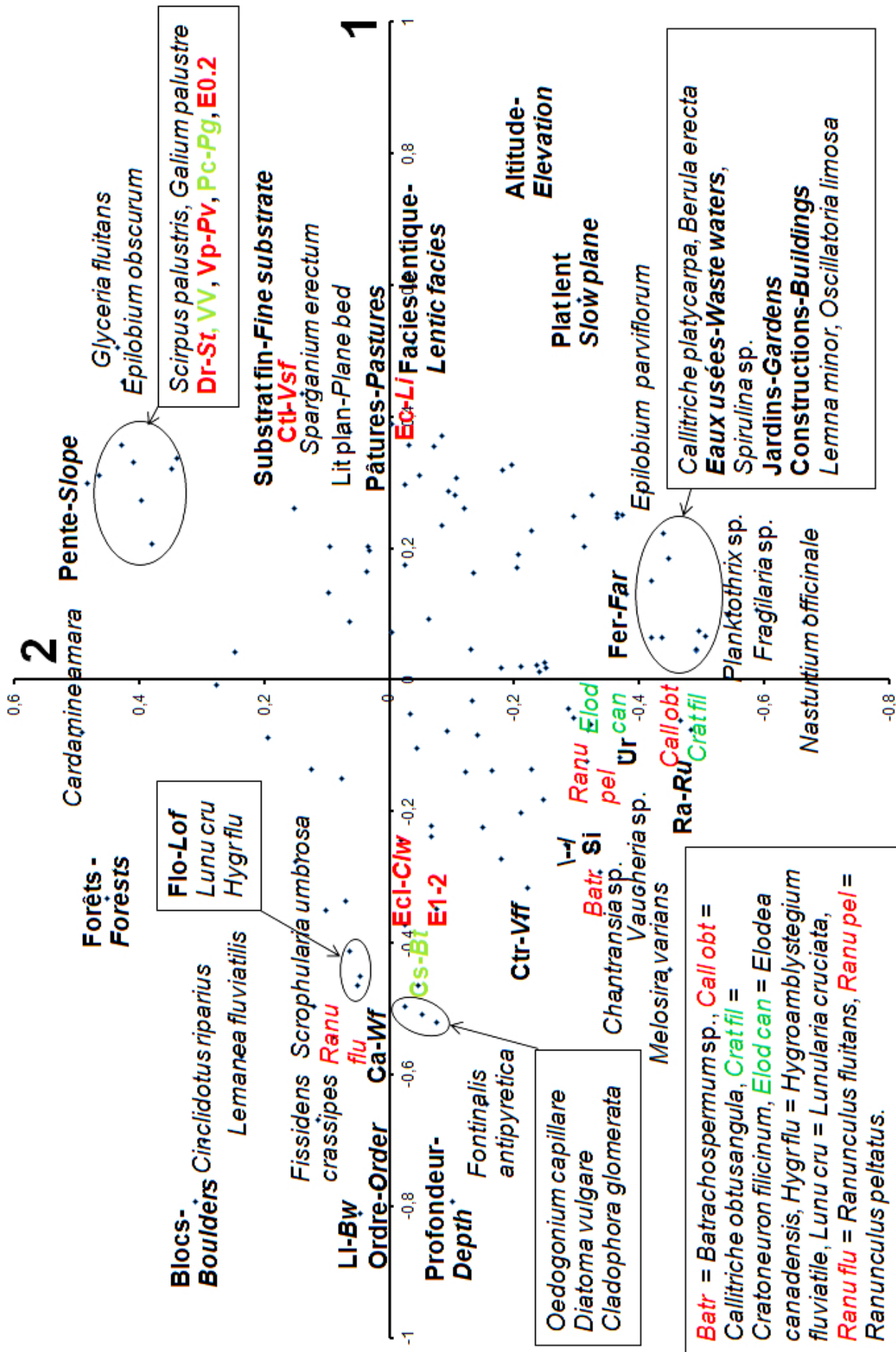


Figure 6. Analyse factorielle multiple des fichiers floristiques et environnementaux. Dispersion des espèces et des facteurs environnementaux dans le plan des axes un et deux. Multiple factor analysis of the floristic and environmental files. Dispersion of species and environmental parameters in the plane of axes one and two.

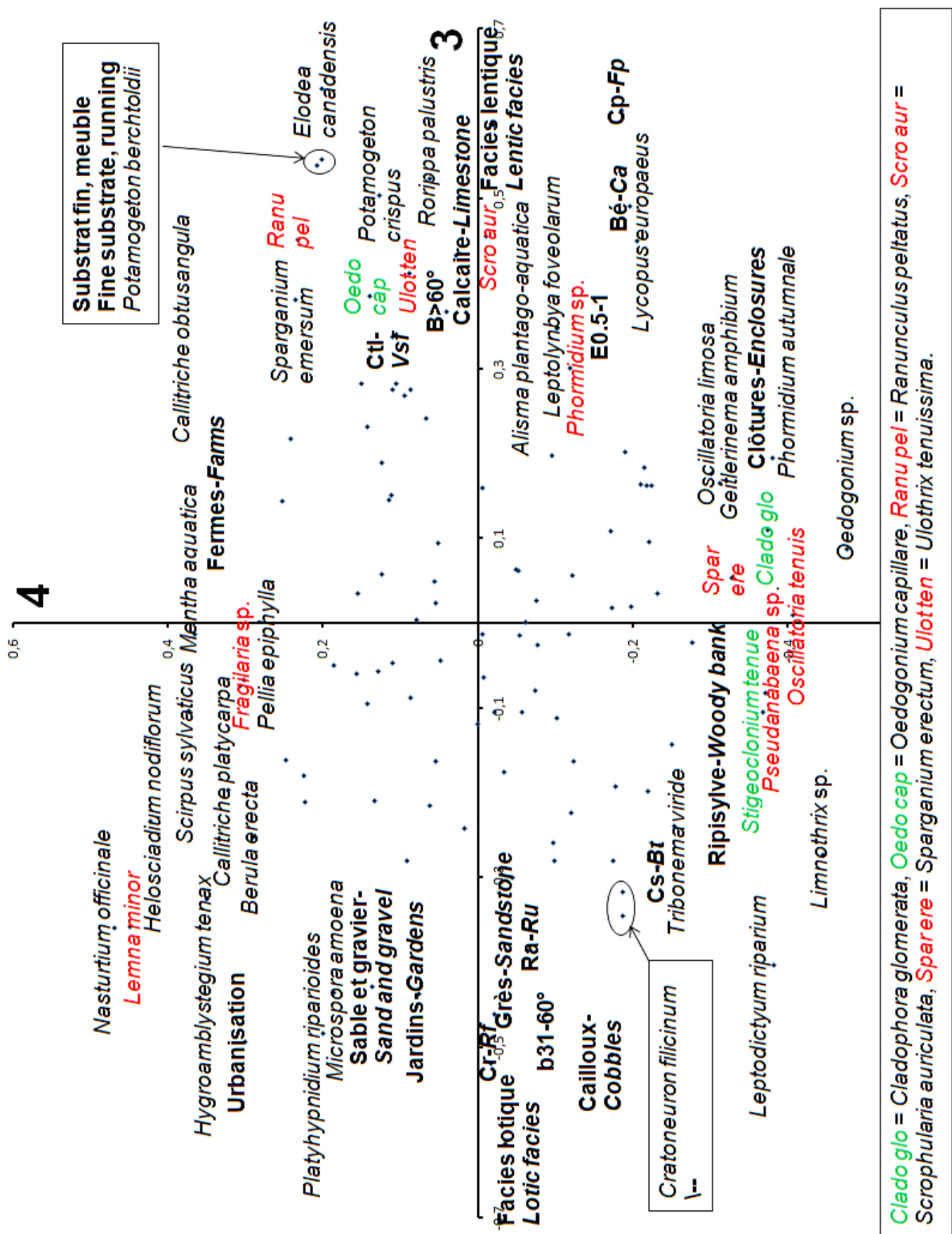


Figure 7. Analyse factorielle multiple des fichiers floristiques et environnementaux. Dispersion des espèces et des paramètres environnementaux dans le plan des axes trois et quatre. Multiple factor analysis of the floristic and environmental files. Dispersion of species and environmental parameters in the plane of axes three and four.

Il s'agit de ruisselets et ruisseaux d'ordre 1 ou 2, de moins de 2,5 m de large, en forte pente (entre 1,4 et 5 %), coulant en milieu gréseux, avec des eaux peu minéralisées (maximum de 8,4 °d), et des concentrations modérées en ammonium (maximum = 0,3 mg•L⁻¹ NH₄⁺), nitrites (maximum = 0,1 mg•L⁻¹ NO₂⁻), nitrates (maximum = 17,5 mg•L⁻¹ NO₃⁻) et orthophosphates (maximum = 0,5 mg•L⁻¹ PO₄³⁻).

3.4.2 Groupement des ruisselets et petits ruisseaux pollués à *Sparganium erectum* et *Leptodictyum riparium*

Dix relevés : B1, V5, V7, PB1, C1, C2, C5, L2, L3 et So.

La combinaison caractéristique des espèces comprend : *Epilobium parviflorum*, *Mentha aquatica*, *Sparganium erectum*, *Veronica beccabugna* (anthophytes), *Leptodictyum riparium*, (bryophytes) et *Limnothrix sp.* (cyanobactérie). La Bryophyte *Platyhypnidium riparioides* et les algues *Chantransia sp.*, *Cladophora glomerata*, *Oedogonium sp.*, *Spirogyra sp.* et *Vaucheria sp.*, les cyanobactéries *Oscillatoria limosa*, *O. tenuis*, *Phormidium autumnale* et *Pseudanabaena sp.* sont fréquentes. Les relevés sont généralement ombragés en partie par *Alnus glutinosa*.

La pente des ruisselets et ruisseaux d'ordre 1 ou 2 est assez faible, neuf fois sur dix égale ou inférieure à 1,25 % et une seule fois égale à 2,5 %, avec un lit mineur souvent encaissé sur un mètre ou plus. Le piétinement par le bétail est nul ou peu important sauf en B1 (partiellement clôturé). Tous les autres paramètres sont très variables.

La chimie de l'eau est marquée par un assez faible pourcentage de saturation en oxygène, qui dépasse rarement 80 % et un minimum de 2,7 % après une mise en assec d'un étang situé en amont de B1. La concentration en ammonium est très variable mais avec plusieurs mesures à 2 et 5 mg•L⁻¹ NH₄⁺. Les orthophosphates ont des concentrations élevées en plusieurs sites (2 à 5 mg•L⁻¹ PO₄³⁻), ainsi que les nitrites (jusqu'à 1 mg•L⁻¹ NO₂⁻).

3.4.3 Groupement à *Nasturtium officinale* et *Oscillatoria limosa* en milieu calcaire

Six relevés du Bocq : B4, B6, B7, B10, B12 et L4.

La combinaison caractéristique des espèces comprend *Alnus glutinosa*, *Berula erecta*, *Callitriche platycarpa*, *Callitriche obtusangula*, *Epilobium parviflorum*, *Glyceria notata*, *Helosciadium nodiflorum*, *Mentha aquatica*, *Nasturtium officinale* (anthophytes), *Cratoneuron filicinum*, *Leptodictyum riparium*, *Platyhypnidium riparioides* (bryophyte); sont fréquentes *Batrachospermum sp.* (dont *B. anatinum*), *Chantransia sp.*, *Cladophora glomerata*, *Fragilaria sp.*, *Melosira varians*, *Microspora amoena*, *Spirogyra sp.* et *Vaucheria sp.* (localement abondante) et les cyanobactéries *Oscillatoria limosa*, *Phormidium autumnale*, *Planktothrix sp.* et *Spirulina sp.*

Ce sont des ruisseaux d'ordre 2 ou 3, larges de 2,5 à 8 mètres, avec une profondeur maximale atteignant un mètre par place, en milieu calcaire, avec une pente faible ne dépassant pas 0,8 %, en milieu urbanisé ou traversant des pâtures.

Le pourcentage de saturation en oxygène est assez moyen et varie entre 58 et 88 %, la dureté totale entre 12,4 et 15,8 °d. L'ammonium n'est pas souvent mesurable et sa concentration ne dépasse pas 0,4 mg•L⁻¹ NH₄⁺. Les orthophosphates sont aussi souvent non mesurables et ne dépassent pas 0,5 mg•L⁻¹ PO₄³⁻. Par contre, les nitrites sont toujours bien présents à des concentrations égales ou inférieures à 0,4 mg•L⁻¹ NO₂⁻. Les concentrations en nitrates sont très variables, entre 5 et 25 mg•L⁻¹ NO₃⁻.

3.4.4 Groupement à *Alnus glutinosa* et *Scrophularia auriculata* des milieux ouverts en zone agricole

Treize relevés : B2, B3, B5, B8, B13, B14, B26, PB2, PB3, PB4, C3, C4 et L5.

La combinaison d'espèces caractéristiques de ce groupement est moins riche, composée principalement d'*Alnus glutinosa* (souvent abondant) et de *Scrophularia auriculata* parmi les anthophytes, de *Platyhypnidium riparioides* comme Bryophyte, de *Chantransia sp.*, de *Cladophora glomerata*, *Melosira varians* et *Vaucheria sp.* parmi les algues et de *Leptolyngbya foveolarum*, *Oscillatoria limosa*, *Phormidium autumnale* et *Planktothrix sp.* comme cyanobactéries. Notons la présence de *Batrachospermum arcuatum* et de *B. atrum*.

Ces organismes se trouvent dans des ruisseaux d'ordre 1 à 3, clairement en milieu ouvert, à proximité de grosses fermes et d'habitations, avec un éclaircissement variable, souvent au milieu de pâtures, mais avec rarement beaucoup de piétinement par le bétail, avec des berges pentues; la pente générale est changeante mais le substrat est composé d'éléments fins, tout au plus de cailloux et très peu de blocs.

La dureté totale est partout supérieure à 12 °d. L'ammonium est peu présent et sa concentration ne dépasse pas 0,5 mg•L⁻¹ NH₄⁺; les nitrites sont mesurables partout avec une concentration maximale de 0,5 mg•L⁻¹ NO₂⁻ et celle en orthophosphates est au maximum de 1 mg•L⁻¹ PO₄³⁻.

3.4.5 Groupement à *Potamogeton berchtoldii* et *Ranunculus peltatus*, en courant lent

Trois relevés : B9, B11 et B15.

Ces deux relevés sont caractérisés par la combinaison des anthophytes suivantes : *Alnus glutinosa*, *Elodea canadensis* (tous deux abondantes), *Callitriche obtusangula*, *Lycopus europaeus*, *Mentha aquatica*, *Potamogeton berchtoldii*, *P. crispus*, *Ranunculus peltatus*, *Rorippa palustris*, *Veronica anagallis-aquatica* et *V. beccabunga*. La mousse *Fontinalis antipyretica* est constante. Sont

communes ou constantes, les algues *Chantransia* sp., *Cladophora glomerata*, *Melosira varians*, *Oedogonium capillare* et *Vaucheria* sp. (localement abondante). Huit espèces de cyanobactéries ont été identifiées, dont *Leptolyngbya foveolarum*, *Oscillatoria limosa*, *O. tenuis*, *Phormidium autumnale*, *Planktothrix* sp. et *Spirulina* sp.

Les caractéristiques environnementales sont très nettes : une pente très faible (0,3 à 0,6 %), un faciès lentique, en milieu calcaire et un éclaircissement égal ou supérieur à 80 %. Le cours est sinueux, traverse des pâtures, la profondeur maximale est comprise entre 0,5 et 1 mètre et le substrat est composé en très grande majorité d'éléments très fins (sable et limon).

3.4.6 Groupement rhéophile à *Ranunculus fluitans* et *Cinclidotus riparius*

Douze relevés : B16 à 25, B27, C6.

Ce groupement du cours inférieur du Bocq et du ruisseau de Crupet est facilement caractérisé par une combinaison d'espèces : les anthophytes *Ranunculus fluitans* (présente ou abondante suivant l'éclaircissement) et *Scrophularia umbrosa*, les bryophytes *Cinclidotus riparius* (localement abondante), *Fissidens crassipes*, *Fontinalis antipyretica*, *Platyhypnidium riparioides*, les algues *Batrachospermum* sp. (dans les sites éclairés et peu profonds), *Chantransia* sp., *Cladophora glomerata*, *Diatoma vulgare*, *Lemanea fluviatilis*, *Melosira varians* et *Vaucheria* sp. sont communes; *Hildenbrandia rivularis* forme des taches rouge sang sur quelques blocs. Une seule espèce de Cyanobactérie est fréquente : *Phormidium autumnale*.

Les relevés d'ordre 3 (un seul d'ordre 2), les plus larges (jusqu'à 15 m) et les plus profonds (jusqu'à 1,5 m), traversant des bois, pâtures ou sites urbanisés, sont généralement fortement encaissés (1 à 2 m) et le substrat est composé en très grande partie de cailloux et blocs. Les faciès lotiques dominent largement.

Ce sont les eaux les plus minéralisées avec partout une dureté supérieure ou égale à 14,4 °d et un pH de 8 ou 8,5. La constante vient des orthophosphates qui sont très généralement mesurables et montrent à plusieurs reprises des concentrations de 0,75 mg•L⁻¹ PO₄³⁻ (les mesures du SPW [Service Public de Wallonie] donnent des maxima compris entre 0,164 et 0,273 mg•L⁻¹ P, soit entre 0,5 et 0,8 mg•L⁻¹ PO₄³⁻), ce qui est à mettre en relation avec l'urbanisation croissante dans le cours inférieur du Bocq.

4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

L'analyse des correspondances d'un tableau disjonctif complet est une technique bien adaptée aux données floristiques car elle permet de traiter des tableaux mélangeant des espèces communes et des espèces rares, sans que cela entraîne les inconvénients observés dans les analyses de tableaux bruts. Les groupes sociologiques décrits ici le sont à partir de l'ensemble complet des données. Ce sont les sites les plus diversifiés qui sont les premiers mis en évidence. Les groupes socioécologiques sont aisément associés à des ensembles de sites; les données sont cartographiées et susceptibles d'être suivies dans le temps. Les analyses multiples réunissent et mettent sur le même pied quatre grands groupes d'organismes, de tailles très différentes, depuis les grands arbres jusqu'aux cyanobactéries microscopiques.

L'analyse en composantes principales de fichiers floristiques et mésologiques réunis apporte, sur les premiers axes, une représentation similaire à celle de l'analyse des correspondances. Cette deuxième technique est donc un outil robuste pour associer végétation et environnement.

La classification est un complément indispensable car elle conduit à la cartographie des résultats et permet d'associer quelques paramètres chimiques pourtant très variables à l'un ou l'autre des groupements. C'est aussi un outil précis pour étudier l'évolution de la végétation dans le temps, par comparaison avec des données anciennes (BOUXIN, 1991), ce qui fera l'objet d'une autre étude. Des travaux viennent d'être réalisés par le Service Public de Wallonie en vue de rétablir la libre circulation des poissons et il sera intéressant d'évaluer l'impact de ces interventions sur les communautés végétales.

Il apparaît que le caractère bioindicateur de certaines espèces prises isolément reste difficile à préciser tellement les assemblages d'espèces sont tributaires d'un ensemble de facteurs qui varient à des échelles spatiales et temporelles différentes. La pollution organique est toujours un paramètre important. Certains paramètres physico-chimiques, comme les nitrates, nitrites ou orthophosphates, sont très largement présents dans tout le bassin versant, reflétant son état général. La fréquence élevée de certaines espèces de cyanobactéries semble plus liée à cette forme de contamination permanente des eaux de surface qu'à des variations locales ou temporelles. Leur développement local est étroitement lié aux conditions climatiques : ensoleillement et chaleur sont deux facteurs importants et très variables. D'une saison à l'autre, la même espèce voit un développement

très différent. C'est la raison pour laquelle il est primordial d'étudier un bassin versant pendant plusieurs années et de visiter certains sites plusieurs fois par année. Il importe aussi de comparer les groupes écologiques ou les groupements avec ceux de bassins versants voisins mais cette comparaison reste délicate car la combinaison de facteurs environnementaux n'est jamais exactement la même d'un site à l'autre. Une forte similitude est aisément établie entre les groupements à *Callitriche platycarpa* et *Glyceria notata* de la Molignée (BOUXIN, 2011a) et le groupement à *Nasturtium officinale* et *Oscillatoria limosa* du Bocq; des espèces caractéristiques ou communes s'y retrouvent comme *Leptodictyum riparium*, *Microspora amoena*, *Spirogyra sp.*, *Vaucheria sp.* ou *Phormidium autumnale*; la pollution organique et domestique y est importante. Un groupement semblable est observé dans le Flavion (principal affluent de la Molignée). Le cours inférieur de la Molignée, sur les quatre derniers kilomètres, est comparable au cours inférieur du Bocq dans lequel la végétation est plus facilement caractérisée car le débit d'eau y est beaucoup plus important. C'est ainsi que certaines espèces se révèlent avant tout rhéophiles comme *Ranunculus fluitans*, *Cinclidotus riparius*, *Fissidens crassipes*, *Fontinalis antipyretica*, *Cladophora glomerata* ou *Lemanea fluviatilis* et sont difficilement utilisables comme bioindicatrices de qualité d'eau en rapport avec la pollution, du moins à l'échelle de ce travail. D'autres espèces sont aussi liées en priorité à la lithologie : *Cardamine amara* est présente aussi bien dans les ruisselets que dans les marges de ruisseaux en milieu gréseux. Par contre, *Cratoneuron filicinum* s'observe en milieu calcaire. Ce sont donc les combinaisons d'espèces qui paraissent les meilleurs indicatrices de la qualité d'eau : abondance de *Callitriche platycarpa* et *Nasturtium officinale*, présence de *Microspora amoena* dans les cours supérieurs dans les petits ruisseaux recevant des eaux usées domestiques ou agricoles, fréquence de plusieurs espèces de cyanobactéries en milieu exclusivement agricole avec *Geitlerinema amphibium*, *Limnothrix sp.*, *Oscillatoria limosa*, *O. tenuis*, *Planktothrix sp.*, *Spirulina sp.*. Dans les cours lents ou en période d'étiage, *Callitriche obtusangula* semble un bon indicateur d'une minéralisation élevée de l'eau.

Les résultats de ce travail sont des outils susceptibles d'être utilisés pour formuler des propositions de gestion visant à améliorer la qualité de l'eau.

REMERCIEMENTS

Nous remercions tout particulièrement La Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement de Wallonie (SPW, DGO3) qui nous a aimablement fourni des analyses chimiques d'eau du Bocq, Monsieur P. COMPÈRE (Jardin Botanique National de Meise) qui a examiné plusieurs échantillons d'algues et de cyanobactéries, le Professeur M.L.

VIS (Université d'Athens, Ohio) et ses collaborateurs qui ont identifié *Batrachospermum anatinum* et *B. arcuatum* grâce aux techniques d'analyses moléculaires de leur ADN et M^{me} CAIJSEELE (Service Technique de la Province de Namur) qui a réalisé la carte du bassin versant.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERTHET, P., E. FEYTMANS, D. STEVENS et A. GENETTE (1976). A new divisive method of classification illustrated by its applications to ecological problems. Dans: *Proceedings of the 9th International Biometric Conference*. Invited papers, 22-27 août, Boston, MA, USA, Vol. II, pp. 366-382.
- BOUXIN, G. (1987). La végétation herbacée des ruisselets d'un massif boisé sur roches éodévonniennes, en Belgique. Dans : *Colloque Phytosociologie et Conservation de la Nature*, XV, Strasbourg, France, pp. 93-106.
- BOUXIN, G. (1991). La végétation aquatique et du bord de l'eau dans le bassin versant du Bocq (Condroz, Belgique). *Rev. Sci. Eau*, 4, 185-210.
- BOUXIN, G. (2011a). Évolution de la végétation macrophytique et trophie dans deux ruisseaux du bassin hydrographique de la Molignée (Condroz, Belgique). *Rev. Sci. Eau*, 24, 253-266.
- BOUXIN, G. (2011b). Végétation aquatique du Bocq et qualité d'eau. Dans : *Atlas du Karst Wallon, Commission Wallonne d'Étude et de Protection des Sites Souterrains*, a.s.b.l., pp. 78-87.
- CHESEL, D. (1997). L'analyse factorielle multiple. <http://pbil.univ-lyon1.fr/ADE-4/>. 27 p., (connecté le 17 décembre 2012).
- CHIASSON, W.J., K.G. JOHANSON, A.R. SHERWOOD et M.L. VIS (2007). Phylogenetic affinities of the form taxon *Chantransia pygmaea* (Rhodophyta) specimens from the Hawaiian Islands. *Phycologia*, 46, 257-262.
- DESCY, J.-P. (1973). *La végétation algale benthique de la Meuse belge et ses relations avec la pollution des eaux*. Lejeunia NS, Revue de Botanique, Liège, France, 66, 62 p.
- DUPONT, E. (1998). *Entretien des cours d'eau et l'habitat des poissons*. Service Public de Wallonie, Direction Générale des Ressources naturelles et de l'environnement. 136 p.

- ELORANTA, P., J. KWANDRANS et E. KUSEL-FETZMANN (2011). *Freshwater Flora of Central Europe. Rhodophyta and Phaeophyceae*. Vol. 7, Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, 155 p.
- EMPAIN, A. (1973). *La végétation bryophytique aquatique et subaquatique de la Sambre belge, son déterminisme écologique et ses relations avec la pollution de l'eau*. Lejeunia NS, Revue de Botanique, Liège, France, 69, 58 p.
- ENTWISLE, T.J., M.L. VIS, W.B. CHIASSON, O. NECCHI, JR. et A.R. SHERWOOD (2009). Systematics of the *Batrachospermales* (Rhodophyta) – A synthesis. *J. Phycol.*, 45, 704-715.
- FABRI, R. (1977). *Végétation, production primaire et caractéristiques physico-chimiques d'une rivière de Haute Ardenne (Belgique) : la Warche supérieure*. Lejeunia NS Revue de Botanique, Liège, France, 87, 43 p.
- FOERSTER, J., A. GUTOWSKI et J. SCHAUMBURG (2004). Defining types of running waters in Germany using benthic algae: A prerequisite for monitoring according to the Water Framework Directive. *J. Appl. Phycol.*, 16, 407-418.
- FOUCART, T. (1982). *Analyse factorielle. Programmation sur micro-ordinateurs*. Masson, Paris, 246 p.
- HAUER, F.R. et G.A. LAMBERTI (1996). *Methods in stream ecology*. Academic Press, 674 p.
- HAURY J. et J.L. BAGLINIERE (1990). Relations entre la population de truites communes (*Salmo trutta*), les macrophytes et les paramètres du milieu sur un ruisseau. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 318, 118-131.
- HAURY, J. et S. MULLER (1991). Variations écologiques et chorologiques de la végétation macrophytique des rivières acides du Massif armoricain et des Vosges du Nord (France). *Rev. Sci. Eau*, 4, 463-482.
- HAURY, J., M. JAFFRÉ, A. DUTARTRE, M.-C. PELTRE, J. BARBE, M. TRÉMOLIÈRES, M. GUERLESQUIN et S. MULLER (1998). Application de la méthode « Milieu et végétaux aquatiques fixés » à 12 rivières françaises : typologie floristique préliminaire. *Annal. Limnol.*, 34, 129-138.
- HAURY, J., M.-C. PELTRE, S. MULLER, M. TRÉMOLIÈRES, J. BARBE, A. DUTARTRE et M. GUERLESQUIN (1996). Des indices macrophytiques pour estimer la qualité des cours d'eau français : premières propositions. *Écologie*, 27, 233-244.
- HAURY, J., M.-C. PELTRE, M. TRÉMOLIÈRES, J. BARBE, G. THIÉBAUT, I. BERNEZ, H. DANIEL, P. CHATENET, G. HAAN-ARCHIPOF, S. MULLER, A. DUTARTRE, C. LAPLACE-TREYTURE, A. CAZAUBON et E. LAMBERT-SERVIEN (2006). A new method to assess water trophy and organic pollution – the Macrophyte Biological Index for Rivers (IBMR): its application to different types of river and pollution. *Hydrobiologia*, 570, 153-158.
- JOHN, D.M., B.A. WHITTON et A.J. BROOK (2011). *The freshwater algal flora of the British Isles. An identification guide to freshwater and terrestrial algae*. Cambridge University Press, UK, 878 p.
- KOMÁREK, J. et K. ANAGNOSTIDIS (2005). Freshwater flora of Central Europe. *Cyanoprokaryota*. 19/2. Teil : *Oscillatoriales*. Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, 758 p.
- LAMBINON, J., L. DELVOSALLE et J. DUVIGNEAUD (avec la collaboration de D. GEERINCK, J. LEBEAU, R. SCHUMACKER et H. VANNEROM (2004). *Nouvelle flore de la Belgique, du Grand-Duché de Luxembourg, du Nord de la France et des Régions voisines (Ptéridophytes et Spermatophytes)*. Cinquième édition. Éditions du Patrimoine du Jardin botanique national de Belgique, Meise. 1167 p.
- MANLY, B.F.J. (1997). *Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology*. Chapman et Hall, 399 p.
- NGUETSOP, V.F., Th. FONKOU, M. LEKEUFAK et J.Y. PINTA (2009). Assemblages d'algues et relations avec quelques paramètres environnementaux dans deux sites marécageux de l'Ouest-Cameroun. *Rev. Sci. Eau*, 22, 15-27.
- PORTER, S. D., D.K. MUELLER, E. NORMAN, E. SPAHR, M.D. MUNN et N.M. DUBROVSKY (2008). Efficacy of algal metrics for assessing nutrient and organic enrichment in flowing waters. *Freshwater Biol.*, 53, 1036-1054.
- ROUX, M. (1985). *Algorithmes de classification*. Masson, Paris, 152 p.
- ROYER, J.-M. (2009). *Petit précis de phytosociologie sigmatiste*. Bulletin de la Société Botanique du Centre-Ouest. Nouvelle Série. Numéro spécial 33, 86 p.
- SCHAUMBURG, J., C. SCHRANZ, J. FOERSTER, A. GUTOWSKI, G. HOFMANN, P. MEILINGER, S. SCHNEIDER et U. SCHMEDTJE (2004). Ecological

classification of macrophytes and phytobenthos for rivers in Germany according to the Water Framework Directive. *Limnologica*, 34, 283-301.

SOTIAUX A., H. STIEPERAERE et A. VANDERPOORTEN (2007). Bryophytes checklist and European red list of the Brussels-Capital Region, Flanders and Wallonia (Belgium). *Belg. J. Bot.*, 140, 174-196.

VANDERPOORTEN, A. (1999). *Correlative and experimental investigations on the segregation of aquatic Bryophytes as function of water chemistry in the Walloon hydrographic networks*. Lejeunia NS, Revue de Botanique, Liège, France, 159, 17 p.