

n° 20420

PARC NATUREL REGIONAL
DES VOSGES DU NORD

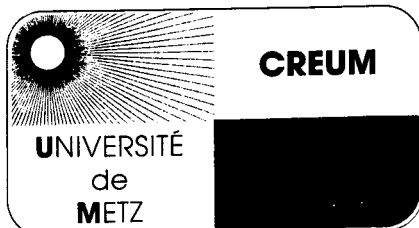
STRUCTURATION ET EVOLUTION DES GROUPEMENTS MACROPHYTIQUES INDUITS PAR LES PERTURBATIONS LIEES A L'EUTROPHISATION OU L'ACIDIFICATION DES EAUX:

Les cours d'eau sur substrat gréseux des Vosges du Nord et du massif du Donon.



THIEBAUT Gabrielle
sous la direction de **Serge MULLER**

CENTRE DE RECHERCHES ECOLOGIQUES
UNIVERSITE DE METZ
Equipe de Phytoécologie



Avril 1996.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	3
Macrophytes et eutrophisation.....	4
Macrophytes et acidification.....	5
Le cas des Vosges du Nord.....	6
1^{ERE} PARTIE: PRESENTATION DU SECTEUR D'ETUDE	7
1. Situation topographique et cadre géologique.....	8
2. Hydrologie du bassin versant de la Haute Moder.....	8
3. Données climatiques.....	10
4. Milieu biologique.....	10
2ND PARTIE: RELATIONS ENTRE LA DISTRIBUTION DES MACROPHYTES ET LE NIVEAU TROPHIQUE DES COURS D'EAU DES VOSGES DU NORD	12
1. INTRODUCTION: Etat des connaissances sur les relations entre la distribution des macrophytes et la qualité de l'eau.....	13
1.1. Variations morphologiques et physiologiques des populations de macrophytes.....	13
1.2. Distribution et écologie des espèces et des groupements.....	14
1.3. L'utilisation d'indices macrophytiques.....	15
1.4. Groupements végétaux-qualité de l'eau et du milieu.....	16
1.5. Le protocole Milieu-ét-Végétaux (M.E.V.).....	17
2. MATERIEL ET METHODES.....	20
2.1. Le choix des stations:.....	20
2.2. La phase de terrain.....	22
2.3. Mesure des paramètres physico-chimiques.....	23
2.4. Traitement des données.....	24
3. RESULTATS.....	25
3.1. Analyse de la végétation macrophytique.....	25
3.2. Physico-chimie des eaux.....	28
3.3. Relations entre la physico-chimie et la végétation.....	30
3.4. Caractérisation mésologique des unités phytosociologiques.....	32
4 DISCUSSION.....	34
4.1. Etude physico-chimie de la qualité de l'eau.....	34
4.2. Relations entre les phanérogames et la qualité de l'eau.....	35
4.3. Relations entre les algues filamenteuses et la qualité de l'eau.....	37
4.4. Relations entre les bryophytes et la qualité de l'eau.....	39

2020

5. APPLICATIONS AU MONITORING DE LA QUALITE DE L'EAU.....	41
5.1. Utilisation de l'échelle de bioindication de l'eutrophisation par les macrophytes aquatiques.....	41
5.2. Comparaison de la séquence d'eutrophisation des Vosges du Nord avec celle établie en plaine d'Alsace	43
5.3. Comparaison des séquences de groupements végétaux des cours d'eau des Vosges du Nord, de Bretagne et de Lozère.....	47
5.4. Extension à d'autres territoires d'Europe occidentale.....	48
3^{EME} PARTIE: RELATIONS ENTRE LES MACROPHYTES ET L'ACIDIFICATION DES EAUX	
1. DONNEES GENERALES SUR L'ACIDIFICATION.....	50
1.1. Retombées atmosphériques acides	50
1.2. Acidification des sols.....	53
1.3. Impact de l'acidification sur les eaux de surface.....	54
1.4. Conséquences et impact de l'acidification sur les macrophytes.....	56
1.5. L'acidification dans le massif vosgien.....	55
2. MATERIELS ET METHODES:.....	57
2.1. Etude sommaire des sols.....	58
2.2. Le choix des stations.....	58
2.3. Mesures des paramètres physico-chimiques.....	59
2.4. Les traitements statistiques:.....	60
2.5. L'analyse de la végétation	60
3. RESULTATS ET DISCUSSION.....	61
3.1. Caractéristiques des sols dans les Vosges du Nord.....	61
3.2. Caractéristiques physico-chimiques des cours d'eau.....	61
3.3. Relation entre la composition physico-chimique des cours d'eau et les communautés végétales	67
4. EXTENSION AU MASSIF DU DONON	
4.1. Le secteur du Donon	75
4.2. Matériel et méthodes	75
4.3. Résultats et discussion	76
4.4. Comparaison entre les cours d'eau des Vosges du Nord et du Donon.....	80
4^{EME} PARTIE: SYNTHESSES DE L'ETUDE ET PERSPECTIVES D'APPLICATIONS	85
1. Eutrophisation des cours d'eau des Vosges du Nord.....	86
2. Acidification des cours d'eau sur grès vosgien:.....	92

Les milieux aquatiques lotiques se comportent comme des systèmes écologiques ouverts particulièrement fragiles. Ils sont d'une extrême sensibilité à certaines nuisances (intervention humaine) qui se manifestent notamment par des pertes de complexité de structure (CARBIENER *et al.*, 1990), et par des variations de productivité.

L'état d'un écosystème aquatique dépend de la qualité de l'eau qui influence à son tour la nature et la structure des biocénoses. Les biocénoses apparaissent ainsi comme un outil de diagnostic efficace de la qualité de l'eau et un test de sensibilité à la pollution des eaux.

MACROPHYTES ET EUTROPHISATION

VERNEAUX (1976) définit l'eutrophisation comme un "processus conduisant à l'état d'équilibre correspondant à une production optimale non en producteurs ou en décomposeurs, mais en consommateurs dont l'abondance optimale dans la diversité maximale serait représentative du stade le plus eutrophe". Pour CARBIENER *et al.* (1990), l'eutrophisation désigne un enrichissement en éléments fertilisants et plus exactement une augmentation de la biodisponibilité des éléments fertilisants. L'eutrophisation ne devient une nuisance qu'au-delà de certains seuils qui dans les milieux aquatiques varient beaucoup en fonction de la typologie, tandis qu'elle peut en deçà de ces seuils présenter des aspects très bénéfiques de diversification des écosystèmes aquatiques. Un apport excessif en éléments fertilisants induit un accroissement de la biomasse des producteurs et secondairement des nuisances. Ces perturbations peuvent se traduire par une explosion de la vie algale, une banalisation de la faune et flore avec prédominance d'espèces à amplitude écologique large, peu exigeantes vis à vis des conditions du milieu et même dans les cas les plus graves réduction de la diversité végétale et "désertification" par pollution secondaire des cours d'eau...

Les recherches relatives à la bio-évaluation de la qualité de l'eau ont jusqu'à présent surtout utilisé les macro-invertébrés benthiques (TUFFERY & VERNEAUX, 1968). Ils ont abouti à la mise au point d'une grille opérationnelle de qualité de l'eau en fonction de la polluo-sensibilité variable de ces organismes animaux. Toutefois, il apparaît que ces évaluations sont bien corrélées à la saprobie des rivières, mais relativement mal adaptées à la caractérisation du niveau trophique des eaux oligosaprobies.

En revanche, les macrophytes (grandes plantes aquatiques visibles à l'oeil nu, incluant les algues filamenteuses, les bryophytes, les spermaphytes) sont un lien à la fois avec le milieu physique où ils se trouvent et avec la masse d'eau. Ils indiquent donc certaines particularités morpho-physiques et hydrodynamiques des stations, ainsi que des caractères de la qualité de l'eau. L'examen floristique permet également d'établir des typologies des cours d'eau intégrant la géologie et le milieu physique (HAURY & MULLER, 1991; GRASMUCK & HAURY, 1993; HAURY, 1985).

MACROPHYTES ET ACIDIFICATION

Les cours d'eau de tête de bassin versant sur substrat faiblement minéralisé peuvent subir une acidification de leurs eaux. Ce phénomène représente un problème écologique d'ampleur internationale. Les retombées atmosphériques acides sont reconnues responsables de nombreuses perturbations des écosystèmes tant terrestres qu'aquatiques. Les dépôts atmosphériques acides affectent de vastes régions d'Europe et d'Amérique du Nord. En Europe, des études sur l'acidification ont été menées en Scandinavie, en Grande Bretagne, en Allemagne, en République Tchèque et en France. Les travaux de ODEN (1976) ont établi une relation entre le niveau d'acidification des eaux de surface en Europe du Nord et la nature des retombées atmosphériques liées aux activités humaines. Conséquence directe des transports de polluants à longue distance, ignorant donc les frontières, l'acidification des eaux de surface apparaît comme étant l'un des aspects les plus inquiétants de la dégradation des milieux. Suite aux signes de dépérissement forestier observés dans le massif vosgien au début des années 1980, un programme de recherche, intitulé DEFORPA (DEpérissement FORestier attribué à la Pollution Atmosphérique), a été mis en place en vue d'en identifier les causes. Toutefois bien avant le lancement de ce programme, BOURRIE (1978), lors d'une étude sur l'acquisition de la composition chimique des eaux en relation avec le substratum géologique, mettait en évidence l'acidité des précipitations dans le massif vosgien. Au cours des dernières années de nombreux cours d'eau présentant des problèmes d'acidification ont été recensés dans le Massif Vosgien (PIHAN 1987, PROBST *et al.*, 1990; PARTY *et al.*, 1993). Certains épisodes hydrométéorologiques consécutifs à un stress acide occasionné par de violents orages et la fonte des neiges sont caractérisés par un pH bas ($\text{pH} < 5,5$) et par une faible alcalinité, souvent associés à des concentrations élevées en aluminium (MASSABUAU *et al.* 1987; GUEROLD & PIHAN 1989; GUEROLD 1992). Les études sur l'acidification des eaux se sont focalisées sur les Vosges centrales. Jusqu'à présent, l'existence d'un seul ruisseau acidifié était connue dans les Vosges du Nord (PROBST *et al.*, 1990).

Si l'impact de l'acidification sur les poissons et les macroinvertébrés a fait l'objet de nombreuses études, peu de travaux ont été publiés sur les macrophytes des eaux courantes acidifiées. En Scandinavie et aux Pays-Bas, plusieurs auteurs ont mentionné la disparition des espèces du *Littorellion* et un fort développement des Sphaignes et de *Juncus bulbosus* suite à l'acidification des eaux (GRAHN *et al.* 1974, HULTBERG & GRAHN 1976, ROELOFS, 1983). Aux Pays-Bas, ARTS *et al.* (1990) ont étudié 26 espèces de macrophytes en fonction de leur tolérance aux conditions d'extrême acidité. Suite à ces travaux, MAESSEN *et al.* (1992) ont analysé les effets du pH et du rapport Al/Ca sur cinq espèces de macrophytes. En Allemagne, TREMP & KOHLER (1991b, 1993) ont établi une échelle de bioindication de l'acidification des cours d'eau par les bryophytes. STEPHENSON *et al.* (1995) montrent que la composition des communautés de bryophytes varie en fonction du pH et de la chimie des eaux des cours d'eau des montagnes de Virginie.

LE CAS DES VOSGES DU NORD

Les cours d'eau des Vosges du Nord, qui drainent des substrats gréseux, sont faiblement minéralisés et caractérisés par un niveau trophique bas. Leur évolution vers l'aval conduit naturellement à une augmentation progressive des teneurs en nutriments et en minéraux. Ce processus d'"eutrophisation" est souvent accéléré par des facteurs anthropiques (rejets domestiques, piscicultures intensives, étangs...). Cela conduit à des proliférations végétales avec perte de la diversité biologique parallèlement à l'augmentation des teneurs en nutriments.

Ces ruisseaux apparaissent également très sensibles à l'acidification du fait de la conjonction de plusieurs paramètres (roche-mère de grès vosgien inférieur très pauvre en bases, végétation acidifiante dans les sous-bassins versants, record d'acidité des précipitations dans les Vosges du Nord pour le Massif Vosgien).

Les Vosges du Nord apparaissent ainsi comme un territoire fragile vis à vis de l'eutrophisation (MULLER, 1990; THIEBAUT, 1993; THIEBAUT & MULLER, sous presse) et particulièrement sensible à l'acidification (THIEBAUT *et al.*, sous presse).

L'étude des relations entre les macrophytes et la qualité des eaux des cours d'eau des Vosges du Nord fait l'objet du présent rapport. Ce dernier se décompose en plusieurs parties:

- la première partie correspond à la présentation générale du secteur d'étude,
- la seconde partie représente l'étude des relations entre les macrophytes aquatiques et le niveau trophique des eaux. Une comparaison entre la séquence de bioindication en milieu acide et en milieu carbonaté calcaire des rivières phréatiques du Ried alsacien est réalisée. Puis une étude comparative des cortèges floristiques de base en milieu faiblement minéralisé est effectuée dans un contexte ouest-européen.
- la troisième partie s'intéresse aux rapports existants entre les végétaux et l'acidification des eaux. Une comparaison entre les résultats obtenus dans les Vosges du Nord et dans les cours d'eau du secteur du Donon est présentée.

4EME PARTIE
SYNTHESE DE L'ETUDE ET
PERSPECTIVES D'APPLICATIONS

L'aire d'étude est située dans le Haut bassin versant de la Moder à l'intérieur du périmètre du Parc Naturel Régional des Vosges du Nord. L'altitude moyenne est de 350m (maximum 580 m), le climat subcontinental est caractérisé par une température moyenne annuelle de 8,6° C et des précipitations moyennes annuelles de 900mm à Mouterhouse. Le réseau hydrographique draine un substrat gréseux (grès vosgien inférieur et supérieur) couvert de forêts mixtes (feuillus et résineux) ou de zones tourbeuses.

Les cours d'eau sont faiblement minéralisés et caractérisés par un niveau trophique bas. Leur évolution vers l'aval conduit naturellement à une augmentation progressive des teneurs en nutriments et en minéraux. Ce processus d'"eutrophisation" est souvent accéléré par des facteurs anthropiques (rejets domestiques, piscicultures intensives, étangs...). Cela conduit à des proliférations végétales avec perte de la diversité biologique parallèlement à l'augmentation des teneurs en nutriments.

En France, au cours des dernières années de nombreux cours d'eau présentant des problèmes d'acidification ont été recensés dans le Massif Vosgien (PROBST *et al.*, 1990; PARTY *et al.*, 1993). Les études sur l'acidification des eaux se sont essentiellement développées sur les Vosges centrales. Les facteurs responsables de l'acidification des eaux se trouvent réunis dans les ruisseaux des Vosges du Nord qui paraissent ainsi très sensibles à ce phénomène.

1. EUTROPHISATION DES COURS D'EAU DES VOSGES DU NORD

L'étude des groupements végétaux et de leur structure conduit à l'élaboration de biotypologies floristiques. En effet, l'examen floristique a permis d'établir des typologies des cours d'eau intégrant la géologie, le milieu physique et la qualité de l'eau. Les groupements végétaux, inféodés au milieu, apparaissent alors comme des bioindicateurs du niveau trophique des cours d'eau.

COMPOSITION FLORISTIQUE DES COURS D'EAU DES VOSGES DU NORD

Quatre groupements végétaux ont été distingués dans les cours d'eau faiblement minéralisés des Vosges du Nord.

- "A": groupement à *Potamogeton polygonifolius*.

- "B": groupement à *Potamogeton polygonifolius* et *Callitriche hamulata*. Les stations de type "B" se subdivisent en deux sous-ensembles: le groupe "B1" largement majoritaire et le groupe "B2" représenté par une seule station dans notre échantillonnage. Les stations "B1" sont caractérisées par l'apparition de *Callitriche hamulata*, *C. platycarpa* et ou *C. stagnalis*, accompagnés de *Ranunculus peltatus* et *Sparganium emersum*, ainsi que de *Lemna minor* (en courant plus lent). Parmi les sites "B1", trois stations correspondent à un type de transition entre "A" et "B". Le site "B2" perturbé par des rejets d'étangs de pisciculture, se caractérise à la fois par

un groupement végétal à *Potamogeton polygonifolius*, *Callitriche hamulata*, *C. platycarpa*, *C. stagnalis* et par la présence d'algues filamenteuses (*Vaucheria sp.*, *Oedogonium sp.* et surtout *Nitella flexilis*).

- "C": groupement à *Callitriche hamulata* et *Elodea canadensis*. La disparition de *Potamogeton polygonifolius* et l'apparition d'*Elodea canadensis*, *E. nuttallii* et d'espèces plus rares (*Oenanthe fluviatilis*, *Myriophyllum alterniflorum* et *Potamogeton alpinus*) définissent ce groupement végétal. Les stations de type "C" se subdivisent en deux sous-ensembles: le groupe "C1" et le groupe "C2". Les stations "C1" possèdent un cortège d'hydrophytes de base davantage diversifié et caractérisent des ruisseaux plus profonds et plus larges que les stations "C2". Ces dernières, qui subissent une perturbation du milieu par des rejets, se caractérisent par l'absence d'élodées, par un développement important de callitriches et généralement par la présence d'algues filamenteuses tout au long de l'année. Les seules stations des Vosges du Nord du potamot hybride *Potamogeton variifolius*, sont situées à l'aval de type "C1" du Falkensteinbach (WOLFF, 1990).

- "D": Groupement à *Callitriche hamulata* et *Callitriche obtusangula*. Ce groupement végétal se caractérise par l'apparition de *Callitriche obtusangula*. Les stations de type "D" peuvent également être subdivisées en deux sous-unités. Le groupe "D1" est situé à l'aval des cours d'eau. Le groupe "D2" se caractérise par une apparition précoce dans ces secteurs d'amont de *Callitriche obtusangula* suite à des perturbations anthropiques. Le groupe "D1" se définit par l'absence d'algues filamenteuses en été et par une plus grande diversité floristique (présence de *Callitriche platycarpa*, *Elodea nuttallii*, *Ranunculus peltatus*), alors que le groupe "D2" présente une physionomie sensiblement différente, avec des algues filamenteuses tout le long de l'année et peu de macrophytes en dehors de *Callitriche obtusangula* et *Callitriche hamulata*.

CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES COURS D'EAU DES VOSGES DU NORD

Les cours d'eau qui prennent naissance sur grès vosgien supérieur (Zinsel du Nord et Moder) sont davantage minéralisés que ceux dont les sources sont situées sur grès vosgien inférieur. Il existe une grande variabilité spatio-temporelle des paramètres physico-chimique pour ces cours d'eau sur substrat et à perméabilité homogènes. D'amont en aval, la conductivité, l'alcalinité, le pH, l'ammonium et les orthophosphates augmentent. Les cours d'eau des Vosges du Nord en général faiblement acides et relativement tamponnés, sont caractérisés par une conductivité faible. Les stations de tête de bassin, nettement plus acides, subissent des fluctuations importantes de leur pouvoir tampon. A l'aval du secteur d'étude, les cours d'eau se neutralisent, se tamponnent et s'enrichissent en minéraux dissous. Les eaux oligo-mésotrophes à l'amont deviennent eutrophes voire hypertrophes à l'aval de l'aire d'étude. Pour l'ensemble des stations, la teneur moyenne en nutriments reste modérée. La concentration en nitrates y est toujours faible et n'intervient pas dans le déterminisme de la végétation.

Dans les cours d'eau faiblement minéralisés et relativement peu chargés en nutriments, les variations saisonnières inter-annuelles de la trophie s'expliquent en partie par les fluctuations des précipitations atmosphériques et par le débit variable des cours d'eau. Les premiers résultats montrent des variations inter-annuelles particulièrement nettes pour les nutriments.

Selon les saisons, les végétaux ne sont pas dans les mêmes conditions hydrauliques et mésologiques, les teneurs en nutriments et en minéraux varient. Les données sont insuffisantes pour assurer une bonne interprétation des mécanismes en jeu. Toutefois, quelques tendances se dégagent.

SEQUENCE DE BIOINDICATION DE L'EUTROPHISATION DES COURS D'EAU PEU MINERALISES DES VOSGES DU NORD.

La séquence de groupements végétaux de "A à D" correspond à une neutralisation ionique progressive et une eutrophisation croissante des eaux de ces rivières, marquées en particulier par une augmentation progressive du taux d'orthophosphates solubles et d'azote ammoniacal de l'amont à l'aval des cours d'eau. De l'unité végétale "A" à l'unité "D", l'évolution des paramètres de minéralisation reflètent une neutralisation progressive des eaux. La conductivité moyenne augmente des zones amont vers les zones aval. Les eaux faiblement tamponnées à la source se chargent en bicarbonates et deviennent bien tamponnées à l'aval. De même, les paramètres de la trophie traduisent une eutrophisation nette de "A" vers "D". Cette augmentation de la trophie varie de manière parallèle à celle de la richesse floristique des stations. Les teneurs moyennes en éléments nutritifs sont voisines pour les cours d'eau de type "A" ou "B" et atteignent des valeurs élevées à l'aval des ruisseaux pour les types "C" et "D". Les teneurs en nitrates restent très faibles et ne varient que très peu sur une grande partie du linéaire, tout en augmentant légèrement à l'aval.

UTILISATION DE L'ECHELLE DE BIOINDICATION DE L'EUTROPHISATION PAR LES MACROPHYTES AQUATIQUES POUR L'EVALUATION DE LA QUALITE DE L'EAU

La séquence "A→B→C→D", reflétant l'évolution normale de la végétation de ces rivières de l'amont vers l'aval sous l'influence des facteurs abiotiques, est souvent accélérée et perturbée par des activités humaines. En particulier, l'apparition précoce d'un type "C" ou "D" dans des eaux encore relativement acides et peu minéralisées (correspondant normalement à des types moins évolués) révèle une eutrophisation anthropique manifeste.

- Le Schwarzbach est un ruisseau à séquence complète "A→B1→C1→D1". D'amont en aval les eaux du Schwarzbach se minéralisent et se chargent en nutriments.

- Le Falkensteinbach est un ruisseau à séquence incomplète "B2→C1". La minéralisation (conductivité, alcalinité et pH) augmente de l'amont vers l'aval. A l'amont les rejets des bassins de piscicultures sont à l'origine de la dégradation de la qualité de l'eau, qui se traduit par la présence d'algues réputées indicatrices de niveau trophique élevé. Les affluents du Falkensteinbach sont en général de meilleure qualité au niveau des sources (affluent I de type "A→B1", affluent II de type "A→A", affluent III à séquence accélérée "A→C2").

- La Zinsel du Nord traverse tout un chapelet d'étangs. Un accroissement des concentrations en nutriments et en cations s'observe de l'amont vers l'aval. Le cours principal est mésotrophe et de type "C1"; les affluents sont de qualité supérieure, mais amorcent une détérioration qui semblent être liée à la présence d'étangs. La différence de minéralisation entre les

affluents et le cours principal s'explique par le substratum géologique dissemblable (grès vosgien supérieur et inférieur). La présence en amont d'étangs se traduit par une augmentation des teneurs en azote ammoniacal et semble favoriser le développement de *Callitriche platycarpa*.

- Le Rothbach est un ruisseau à séquence accélérée "A→B→C2→D2". Les paramètres de minéralisation sont relativement constants tout le long du ruisseau; ils augmentent de manière importante à l'aval du cours d'eau. La zonation oligotrophe-eutrophe s'amorce très rapidement et ne correspond pas à l'évolution spatiale du pH et de la conductivité. Le classement en type "D" est dû à la présence de *Callitriche obtusangula* et aux forts taux de nutriments. L'enrichissement en ammonium du cours d'eau a pour origine des activités anthropiques (rejets domestiques, piscicultures) et un pâturage intensif. La présence très abondante de *Nitella flexilis* et l'absence de *Potamogeton polygonifolius* est certainement corrélée à ces rejets domestiques.

- La Moder est une rivière à niveau trophique élevé de type "D2/D1". Cet enrichissement en nutriments semble être lié à la présence d'étangs dès l'amont. La minéralisation plus importante de la source (grès vosgien supérieur) est probablement la cause de l'absence de *Potamogeton polygonifolius*, du pH neutre et de la conductivité relativement élevée.

- Le Mittelbach est un ruisseau de type "C2". L'impact des rejets de la commune de La Petite Pierre sur la qualité de l'eau est très important. Une des conséquences en serait la disparition de *Potamogeton alpinus*, présent il y a 30 ans (ENGEL & KAPP, 1964) et l'absence d'Elodées. Ce cours d'eau contient des teneurs très élevées en nutriments pour une faible conductivité. Cela se traduit par l'absence de *Potamogeton polygonifolius* et par un appauvrissement floristique général. A l'aval, une pisciculture et un village constituent des sources d'apports considérables en azote ammoniacal. Les analyses d'eau mettent en évidence le déséquilibre de la communauté végétale et la présence de fortes teneurs en azote ammoniacal. L'absence de *Callitriche obtusangula* empêche toutefois le classement en "D" de ces stations. Une répartition de ces sites en fonction de la chimie, conduirait à un déclassement de "C2" vers "D2". Cette absence de cohérence végétation-chimie s'explique par le retard d'apparition des plantes par rapport à la chimie. On peut toutefois prévoir la colonisation prochaine de ce ruisseau par *Callitriche obtusangula*.

COMPARAISON DE LA SEQUENCE DE BOINDICATION DE L'EUTROPHISATION DES EAUX ACIDES (VOSGES DU NORD) ET DE LA SEQUENCE ETABLIE EN MILIEU CARBONATE CALCAIRE (RIED ALSACIEN)

Une séquence de bioindication par les macrophytes aquatiques de l'eutrophisation des rivières phréatiques oligosaprobies à 5 échelons a d'abord été établie (CARBIENER & ORTSCHKEIT, 1987). Par la suite, cette échelle a été étendue à 7 échelons, pour caractériser en plus les secteurs eutrophes et hypertrophes mésosaprobies de la plaine d'Alsace (ROBACH, 1994).

Une comparaison entre la séquence de bioindication de l'eutrophisation des eaux acides (Vosges du Nord) et la séquence établie en milieu carbonaté calcaire (plaine d'Alsace) a été réalisée par traitements statistiques. Il apparaît que le principal facteur de distribution des

macrophytes est le gradient de minéralisation et secondairement le niveau trophique.

Des espèces indicatrices homologues entre le milieu calcaire et le milieu acide ont pu être mises en évidence. *Potamogeton coloratus* (eaux carbonatées du Ried) et *Potamogeton polygonifolius* (eaux peu minéralisées des Vosges du Nord) sont des espèces homologues caractéristiques de "A". Plusieurs héliophytes sont communs aux deux types de séquence de végétation. Les hydrophytes communs aux eaux calcaires et aux eaux acides sont *Callitriche obtusangula*, *Potamogeton berchtoldii*, *Oenanthe fluviatilis*, *Sparganium emersum*, *Elodea canadensis*, *E. nuttallii*, *Potamogeton crispus*. La seule bryophyte que l'on retrouve dans ces deux milieux est *Fontinalis antipyretica*. Les espèces indicatrices des stades les plus eutrophisés "D" et "E" de la séquence carbonatée manquent totalement dans les stades correspondants des eaux peu minéralisées. Les espèces inféodées aux stades mésotrophes à eutrophes de ces deux séquences montrent d'une manière générale une remarquable similitude de comportement vis à vis de la trophie dans les deux séquences avec quelques variations d'optimum pour *Oenanthe fluviatilis* et *Callitriche obtusangula*.

Les 2 séquences présentent un gradient trophique différent avec des gammes plus grandes pour les eaux acides que calcaires. Ainsi, la séquence "A" calcaire correspond à des eaux oligotrophes alors que le groupement végétal "A" de la séquence acide est plutôt oligo-mésotrophe. De même, *Oenanthe fluviatilis* correspond au groupement végétal "C" du milieu acide et au type "E" de la séquence calcaire.

Les espèces des ruisseaux acides semblent moins sensibles à l'eutrophisation que les espèces des milieux calcaires. En effet, l'ammonium est plus toxique en milieu calcaire qu'en milieu acide où il est surtout présent sous sa forme ionisée non toxique (DENDENE *et al.*, 1993). Le rôle du phosphore et les mécanismes de son absorption restent à être déterminés en milieu acide.

COMPARAISON ENTRE LES SEQUENCES DE BOINDICATION DE L'EUTROPHISATION DES DIFFERENTS TERRITOIRES AUX EAUX ACIDES (VOSGES DU NORD, BRETAGNE ET LOZERE)

Une comparaison entre les associations rhéophiles des rivières acides du Massif Armoricain, de Lozère et des Vosges du Nord a prouvé qu'il existe un cortège floristique de base qui s'appauvrit le long d'un gradient géographique ouest-est. Une synthèse sur les groupements à callitriches et renoncules des rivières acides de Bretagne, de Lozère et des Vosges du Nord a été publiée (HAURY *et al.*, 1995). Il est apparu que les espèces se répartissent selon plusieurs gradients:

- un gradient de minéralisation qui augmente de l'amont vers l'aval
- un gradient de trophie entre les stations oligotrophes (*Potamogeton polygonifolius*...) et eutrophes (*Callitriche obtusangula*, algues filamenteuses à *Vaucheria*).
- un gradient géographique entre la Bretagne, la Lozère et les Vosges du Nord se traduisant par la présence en Bretagne d'espèces atlantiques (*Oenanthe crocata*, *Luronium natans*, *Apium inundatum*), absentes en Lozère et dans les Vosges du Nord.

EXTENSION A D'AUTRES TERRITOIRES D'EUROPE DE L'OUEST

Des comparaisons bibliographiques avec des relevés phytosociologiques établis dans d'autres pays occidentaux montrent que cette association du *Callitrichetum hamulatae* liée à la faible minéralisation de ces eaux acides, présente une grande homogénéité floristique sur son aire de répartition atlantique et subatlantique. L'ensemble floristique de base est constitué par *Callitriche hamulata*, *Myriophyllum alterniflorum*, *Potamogeton alpinus*; ces espèces sont retrouvées en Ecosse, Bretagne, Saxe, Bavière et dans les Vosges du Nord. Plusieurs espèces différencient la race atlantique: *Luronium natans*, *Apium inundatum*, *Oenanthe crocata*. Un gradient géographique Ouest-Est se traduit par le remplacement de *Ranunculus penicillatus* par *Ranunculus peltatus*.

Il est ainsi possible de mettre en évidence 3 races géographiques:

- une race atlantique : Bretagne, Irlande, Iles Britanniques
- une race subatlantique: Vosges du Nord, Palatinat, Saxe, Luxembourg
- une race nordique ou montagnarde avec la présence de *Fontinalis squamosa*: Ecosse, Ardennes.

2. ACIDIFICATION DES COURS D'EAU SUR GRÈS VOSGIEN:

Conséquence directe des transports de polluants à longue distance, l'acidification des eaux de surface apparaît comme étant l'un des aspects les plus inquiétants de la dégradation des milieux. Au cours des dernières années, de nombreux cours d'eau présentant des problèmes d'acidification ont été recensés dans le massif vosgien (PROBST *et al.*, 1990; PARTY *et al.*, 1993). Toutefois, PROBST *et al.*, (1990) n'avaient étudié qu'un seul ruisseau (le "Schoenthal") dans les Vosges du Nord. Les ruisseaux des Vosges du Nord apparaissent pourtant comme très sensibles à l'acidification du fait de la conjonction de plusieurs paramètres (roche-mère de grès vosgien inférieur très pauvre en bases, végétation acidifiante dans les sous-bassins versants, record vosgien d'acidité des précipitations dans les Vosges du Nord).

CARACTERISATION DU DEGRE D'ACIDITE DES COURS D'EAU DES VOSGES DU NORD

Cette étude a permis de mettre en évidence la présence de ruisseaux acidifiés dans les Vosges du Nord. Ceux-ci drainent des bassins versants couverts de forêts mixtes (feuillus et résineux) ou de tourbières et s'écoulent sur un substratum de grès vosgien, correspondant à des types de roches extrêmement pauvres en bases et faiblement altérables. La charge totale dissoute de ces ruisseaux est généralement très faible, montrant bien que les roches drainées sont pauvres. Ces milieux sont donc faiblement tamponnés et peuvent basculer rapidement vers un état (au moins temporairement) d'acidification marquée.

Les cours d'eau ont été classés en quatre classes selon leur degré d'acidification et surtout en fonction de leur pouvoir tampon. Un seul cours d'eau, très acide, ayant perdu son alcalinité, présente des teneurs en aluminium très élevées. Lors d'un stress acide, plusieurs stations faiblement tamponnées subissent de fortes variations de leurs concentrations en bicarbonates. D'autres ruisseaux bien tamponnés semblent relativement indifférents aux conditions d'acidité.

Les têtes de bassin versant de certains cours d'eau des Vosges du Nord indiquent une acidification nette de leurs eaux.

COMPOSITION FLORISTIQUES DES COURS D'EAU ACIDIFIES DES VOSGES DU NORD

L'acidification des eaux s'accompagne de profondes modifications de la composition floristique des cours d'eau. Quatre niveaux de réponses à l'acidification des différentes espèces et associations végétales peuvent y être ainsi distingués:

- la tolérance (*Scapania undulata*, espèce acido-tolérante)
- le maintien dans des conditions d'acidité forte, la plante manifestant toutefois des signes de manque de vigueur (*Potamogeton polygonifolius*, espèce dite acido-dystolérante)
- la capacité de s'accommoder d'une faible acidification (*Callitriche hamulata*, *Ranunculus peltatus*: espèces dites acido-vagues),
- la sensibilité potentielle aux conditions d'acidité faible (*Elodea canadensis*, *Myriophyllum alterniflorum*, *Callitriche obtusangula*: espèces acido-sensibles).

La végétation des sites les plus acidifiés est composée de *Scapania undulata* et de

Potamogeton polygonifolius. Les espèces *Ranunculus peltatus*, *Callitriche platycarpa* et *Callitriche hamulata* se développent dans les ruisseaux faiblement acidifiés, alors que *Myriophyllum alterniflorum* et *Elodea sp.* se rencontrent uniquement dans les cours d'eau bien tamponnés.

Peu de travaux ont été publiés sur l'impact de l'acidification des eaux sur les macrophytes des eaux courantes. ARTS *et al.* (1990) posent comme hypothèse que la disparition d'espèces à un $\text{pH} < 5$ est due soit à la concentration trop faible en carbone inorganique, soit au remplacement peu plausible des nitrates par l'ammonium comme source d'azote, soit à une toxicité de l'aluminium. L'absence de *Potamogeton polygonifolius* dans les eaux les plus faiblement tamponnées pourrait ainsi s'expliquer par la faible concentration en bicarbonates des eaux et par son incapacité à utiliser les bicarbonates du sédiment comme source de Carbone pour la photosynthèse.

L'aluminium dans les cours d'eau acides est considéré comme toxique pour de nombreux organismes aquatiques. Les fortes concentrations observées ne donnent qu'une tendance potentielle, de nombreux facteurs influençant la spéciation de l'aluminium. Dans l'état de nos connaissances actuelles, il est difficile de conclure sur un rôle toxique ou non des fortes concentrations en aluminium total sur les macrophytes. Les conséquences des teneurs élevées en aluminium sur les macrophytes sont mal connues. Il reste à déterminer quels sont les seuils de sensibilité ou de tolérance des macrophytes à l'acidification et sous quelles conditions l'aluminium est toxique pour les végétaux aquatiques, si l'aluminium interfère avec le calcium et le phosphore dans le métabolisme des macrophytes (BRAKKE *et al.*, 1994).

ACIDIFICATION DANS LE MASSIF DU DONON

De nombreux travaux de recherche ont déjà été effectués dans ce secteur réputé très sensible à l'acidification. Cinq vallées du secteur lorrain situées sur grès ont été retenues dans notre étude. L'état d'acidification de ces cours d'eau a été étudié et comparé avec les données de la bibliographie.

La Sarre Blanche et la Plaine, bien tamponnées sont des cours d'eau alcalins types. La rivière la Plaine prend sa source sur grès permien alors que son affluent très acide est situé sur grès vosgien. Le Val et ses affluents ainsi que le Châtillon et ses affluents sont très faiblement tamponnés, à la limite de l'acidité. Le Rabodeau dans sa partie amont est atypique. En effet, les cours d'eau du Grand Bras et Gentil Sapin renferment une teneur élevée en aluminium total. Gentil Sapin est caractérisé par une alcalinité relativement importante par rapport à Grand Bras. L'hypothèse d'un chaulage semble l'explication la plus probable.

Les résultats de l'échelle de bioindication de l'acidification par les macrophytes ont été également appliqués aux cours d'eau du massif du Donon. Les eaux du massif du Donon sont caractérisées par un cortège de bryophytes de base à *Scapania undulata* et *Marsupella emarginata* pour les stations les plus acides, de *Rhynchostegium riparoides* pour les eaux acidifiées à faiblement acidifiées et de *Chiloscyphus polyanthos* et *Brachytecium rivulare* dans les sites faiblement acidifiés ou aux eaux proches de la neutralité.

COMPARAISON DU DEGRE D'ACIDIFICATION DES COURS D'EAU DU MASSIF DU DONON ET DES VOSGES DU NORD

Les ruisseaux des Vosges du Nord et du massif du Donon sont situés dans des conditions physiques (altitude, climatologie, vitesse de courant, composition physico-chimique) très différentes et par conséquent difficilement comparables. Les sols peu évolués des Vosges du Nord contrastent fortement avec ceux bien plus podzolisés des forêts de résineux (sapinières, pinèdes, pessières) du versant occidental du Massif du Donon. De même, l'effet climatique dans les Vosges du Nord est certainement moins marqué que dans les Vosges moyennes, d'altitude plus élevée. Toutefois, l'analyse dans les précipitations sous couvert montre que La Petite Pierre apparaît sans conteste comme la station la plus polluée du Massif Vosgien.

La minéralisation est légèrement plus faible dans le Massif du Donon. Les eaux y sont plus acides et moins tamponnées. Les concentrations en aluminium sont en moyenne nettement supérieures dans les eaux du Donon à celles analysées dans les ruisseaux des Vosges du Nord. Le secteur du Donon renferme des eaux davantage acidifiées que celle des Vosges du Nord.

Les concentrations moyennes en azote nitrique sont supérieures dans le massif du Donon à celles mesurées dans les cours d'eau amont des Vosges du Nord. Les eaux sont oligotrophes dans les cours d'eau du secteur du Donon alors qu'elles sont plus chargées en nutriments dans les Vosges du Nord. Dans les Vosges du Nord, les teneurs en nutriments plus élevées dans les ruisseaux s'expliquent en partie par l'anthropisation du milieu (étangs, piscicultures).

COMPARAISON ENTRE LA COMPOSITION FLORISTIQUE DES COURS D'EAU DU MASSIF DU DONON ET CELLE DES VOSGES DU NORD

La comparaison de la composition floristique des cours d'eau des deux secteurs met en évidence la présence de sept espèces de bryophytes communes à ces eaux peu minéralisées, *Sphagnum sp.*, *Scapania undulata*, *Rhynchostegium riparioides*, *Chiloscyphus polyanthos* et *Brachythecium rivulare*. *Sphagnum sp.* et *Scapania undulata* apparaissent comme des espèces indicatrices d'eaux fortement acidifiées à acides. *Rhynchostegium riparioides* se rencontre dans les eaux proches de la neutralité mais périodiquement fortement acidifiées, alors que *Chiloscyphus polyanthos* et *Brachythecium rivulare* colonisent les eaux proches de la neutralité et périodiquement faiblement acidifiées. Les bryophytes sont sous-représentés dans les cours d'eau des Vosges du Nord pour des raisons mésologiques. En revanche, les phanérogames typiques des ruisseaux des Vosges du Nord, *Potamogeton polygonifolius*, *Ranunculus peltatus*, *Callitriche sp.* et *Elodea sp.* sont absents des cours d'eau du Donon.

3. APPLICATION AU BIOMONITORING

Ainsi, une échelle "A→D" bioindicatrice d'eutrophisation progressive des cours d'eau faiblement minéralisés des Vosges du Nord, fondée sur les macrophytes aquatiques, préalablement esquissée par MULLER (1990), a été précisée. Les apports de nutriments et l'accumulation de sédiments organiques sont des facteurs qui favorisent la colonisation des milieux aquatiques par les algues et les macrophytes. Ils se traduisent généralement par des proliférations végétales paucispécifiques. La création de plans d'eau (étangs, bassins de pisciculture...), souvent peu profonds, sont propices aux développements des végétaux.

L'intrusion de *Callitriche obtusangula* dans les zones supérieures de ces cours d'eau traduit des charges phosphatées et ammoniacales anormales. Le suivi des peuplements de *Callitriche obtusangula* et de certains genres d'algues filamenteuses (*Vaucheria sp.*, *Oedogonium sp.*, *Binuclearia sp.*) et surtout la dominance de ces espèces, permet de caractériser un niveau trophique "anormalement" élevé. De même, les variations de la répartition de *Potamogeton polygonifolius* dans les Vosges du Nord permettront de suivre l'évolution de la qualité de l'eau des secteurs amont de ces réseaux hydrographiques (niveau trophique et degré d'acidification).

L'acidification des eaux n'est pas sans poser de problèmes de santé publique et de gestion des ruisseaux. La toxicité des métaux lourds relargués lors des épisodes acides a été démontrée sur la faune et semble effective sur les macrophytes les plus sensibles. Dans les eaux courantes, *Scapania undulata* peut être considéré comme une espèce acido-tolérante et *Potamogeton polygonifolius* comme une espèce acido-dystolérante. Les espèces *Chiloscyphus polyanthos*, *Callitriche platycarpa*, *C. hamulata*, *Ranunculus peltatus*, *Elodea sp.* et *Myriophyllum alterniflorum* y apparaissent dans les eaux moins acides. Parmi ces espèces de phanérogames, *Potamogeton polygonifolius*, capable de se maintenir lors de stress acides, peut être utilisé en complément des bryophytes comme bioindicateur potentiel d'acido-sensibilité, alors que les espèces *Callitriche sp.*, *Ranunculus peltatus*, *Elodea sp.* et *Myriophyllum alterniflorum* traduisent des eaux faiblement acides.

Les macrophytes aquatiques peuvent ainsi permettre d'établir une cartographie fiable et précise, ainsi qu'un suivi à long terme du processus d'acidification des cours d'eau. Elles apparaissent par ailleurs comme des bioindicateurs pertinents et quantifiables de la trophie et de son évolution spatio-temporelle.