



## **U.N.E.C.E.D.**

U.R.B.O. Laboratoire d'Ecologie des Eaux Douces -  
Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix de Namur.

## **C.R.E.U.M.**

E.B.S.E. - Centre de Recherches Ecologiques - Université de Metz

## **C.E.M.E.**

Centre d'Etude et de Modélisation de l'Environnement - Université de Liège

# ***Etude et modélisation du phytobenthos dans les différents types de rivières du bassin Rhin-Meuse***

## **RAPPORT DE SYNTHÈSE**

(1996-1999)

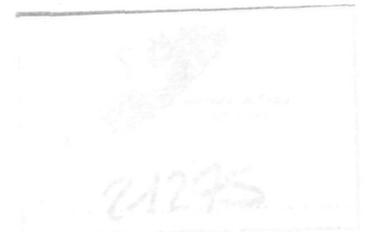
Responsables scientifiques : **J.-P. Descy, L. Léglize, S. Muller**

Rédaction : **M.-C. Peltre, P. Laforge, E. Everbecq**

Modélisation : **E. Everbecq, J.-F. Delière, T. Bourouag**

Coordinatrice : **M.-C. Peltre** ; Collaboration technique : **P. Rousselle**

Participation : **D. Petitdidier, B. Niclaes, J.-C. Foda et J.-N. Beisel**



**AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE**

## **Etude et modélisation du phytobenthos dans les différents types de rivières du bassin Rhin-Meuse.**

### **Rapport de synthèse (1996-1999) RESUME**

Dans le cadre de l'application du modèle mathématique PEGASE au bassin Rhin -Meuse, le sous-modèle relatif au phytobenthos devait être amélioré par une description plus fidèle du compartiment « macrophytes ». Il ne tenait en effet pas compte de la typologie géomorphologique des cours d'eau, dont l'influence sur la végétation aquatique est bien établie. De plus, peu de données quantitatives concernant la biomasse phytobenthique et sa production étaient disponibles.

Un suivi régulier a été mené, de 1996 à 1999, sur une dizaine de cours d'eau représentatifs de la diversité hydrologique, géomorphologique et géochimique du bassin Rhin-Meuse. Une caractérisation physico-chimique de chaque type de cours d'eau a été établie mettant bien en évidence un gradient de minéralisation en fonction de cette typologie (granites < grès < calcaires < marnes-argiles).

Le suivi mensuel des biomasses macrophytiques durant la période estivale a permis de préciser les valeurs de biomasses maximales observées, très différentes selon chaque type (en poids sec : granites : 420 g/m<sup>2</sup>; grès : 619 g/m<sup>2</sup>; calcaires : 490 g/m<sup>2</sup>; marnes-argiles : 1220 g/m<sup>2</sup>). Les valeurs de production primaire brute journalière obtenues suivent globalement bien l'évolution des biomasses, avec des productions maximales enregistrées entre 30 et 35 mgO<sub>2</sub>/l.j.

De plus, afin d'envisager une estimation simplifiée de la biomasse en place, des relations biomasse /recouvrement / épaisseur de la végétation, ont été établies. Parallèlement, des analyses de C, N et P dans 17 espèces de végétaux aquatiques ont été réalisées.

L'évolution annuelle des biomasses permet de définir trois grands types de végétation : cours d'eau à renoncules peltées ou à pinceaux (grès ou granites); cours d'eau à renoncules flottantes (calcaires); cours d'eau à potamot pectiné (marnes-argiles). L'hétérogénéité de la distribution spatiale de la végétation aquatique varie fortement en fonction du cours d'eau considéré (recouvrement moyen de 16 à 72%).

Une modélisation non stationnaire de la croissance du phytobenthos a été réalisée sur 5 tronçons de rivière. Dans l'ensemble, la dynamique de croissance et de décroissance des macrophytes est assez bien rendue par ces modélisations. Elles ont permis de mieux comprendre la dynamique du phytobenthos et de mieux estimer les flux (de carbone, oxygène, phosphore) générés par la présence des macrophytes. Ces renseignements, ainsi que l'ensemble des 'données terrains' recueillies sous forme d'une base de données, permettront d'améliorer prochainement le sous-modèle 'phytobenthos' dans la version stationnaire du modèle PEGASE. A long terme, pour la version non-stationnaire en cours de développement, le sous-modèle de croissance pourra être intégré quasi tel quel et permettra d'améliorer la prise en compte de la dynamique du phytobenthos.

Responsables scientifiques : **J.-P. Descy, L. Léglize, S. Muller**

Rédaction : **M.-C. Peltre, P. Laforge, E. Everbecq**

Modélisation : **E. Everbecq, J.-F. Deliège, T. Bourouag**

Coordinatrice : **M.-C. Peltre** ; Collaboration technique : **P. Rousselle**

Participation : **D. Petitdidier, B. Niclaes, J.-C. Foda et J.-N. Beisel**

## SOMMAIRE

<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2 CADRE GEOLOGIQUE ET GEOGRAPHIQUE : SELECTION DES COURS D'EAU DU BASSIN RHIN-MEUSE.....</b>	<b>2</b>
<b>3 PROTOCOLES.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1 Déroulement de l'étude.....</b>	<b>4</b>
<b>3.2 Choix des stations.....</b>	<b>4</b>
<b>3.3 Analyses physico-chimiques.....</b>	<b>4</b>
<b>3.4 Suivi du phytobenthos.....</b>	<b>4</b>
<b>4 RESULTATS.....</b>	<b>5</b>
<b>4.1 Physico-chimie.....</b>	<b>5</b>
<b>4.2 Phytobenthos.....</b>	<b>5</b>
<b>4.3 Données générales.....</b>	<b>12</b>
<b>5 MODELISATION.....</b>	<b>15</b>
<b>6 DISCUSSION - PERSPECTIVES.....</b>	<b>21</b>
<b>7 TRAVAUX CITES.....</b>	<b>22</b>

## 1 INTRODUCTION

Dans les petits et moyens cours d'eau, la végétation aquatique fixée (phytobenthos) peut avoir une influence considérable sur la qualité de l'eau. Les rôles joués par ces producteurs primaires benthiques sont multiples et la prise en compte de cette composante végétale des écosystèmes aquatiques apparaît de plus en plus indispensable pour la gestion des réseaux hydrographiques.

Dans le modèle PEGASE (Planification Et Gestion de l'Assainissement des Eaux ; Smitz *et al.*, 1997), le phytobenthos et son fonctionnement font l'objet d'un sous-modèle générant des simulations que l'on peut considérer satisfaisantes dans une optique de planification globale de l'épuration à l'échelle d'un bassin entier. Cependant, le sous-modèle « phytobenthos » est décrit comme un compartiment unique (micro- et macrophytes confondus), avec des cinétiques d'assimilation et de croissance simplifiées. Il semble atteindre ses limites lorsqu'il s'agit d'applications plus locales, comme la simulation d'une action quelconque sur les manifestations de l'eutrophisation dans un tronçon de cours d'eau donné.

Or, l'influence de la typologie géomorphologique et de l'environnement sur le phytobenthos (voir notamment Grasmück *et al.*, 1993), non prise en considération dans ce sous-modèle, a été démontrée. De plus, les observations concernant la dynamique de croissance, les biomasses, l'assimilation de nutriments et la production du phytobenthos réalisées dans la Lhomme en Belgique (Laforge *et al.*, 1995) et dans le Vair en France (Gosse, 1989 ; Légilize & Peltre, 1990), indiquent des différences importantes selon le type de végétation (algues ⇔ phanérogames), mettant en évidence la nécessité de distinguer ces différents types "phytobenthiques" dans la modélisation proposée.

Cette étude, qui s'est déroulée sur une période de trois années (1996-1999), a donc eu comme objectif principal l'amélioration des connaissances sur le phytobenthos, son fonctionnement et la prise en compte de la typologie des cours d'eau du bassin Rhin-Meuse, dans le cadre du développement du sous-modèle "phytobenthos" de PEGASE.

Dans ce but, un certain nombre de données devaient être acquises :

- sur le phytobenthos lui-même au cours de la période de croissance : données qualitatives, données quantitatives moyennes et maximales, notion d'hétérogénéité de répartition de la végétation sur le cours d'eau, valeurs de production primaire, cycles de croissance, variations saisonnières selon les types de cours d'eau,
- sur certains paramètres environnementaux, notamment physico-chimiques.

## 2 CADRE GEOLOGIQUE ET GEOGRAPHIQUE : SELECTION DES COURS D'EAU DU BASSIN RHIN-MEUSE

Les cours d'eau lorrains du Bassin Rhin-Meuse se répartissent sur les bassins principaux de la Moselle et de la Meuse, sur des formations géologiques qui peuvent être classées selon les critères de perméabilité proposés par Zumstein *et al.* (1989), et également selon la typologie proposée par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (1994).

Cinq couples de cours d'eau représentatifs ont été retenus au départ, avec si possible le choix pour chacun de ces types, de deux cours d'eau représentant des niveaux de qualité différents ("pseudo-naturel" témoin (PN) et état dégradé (ED)) (**tableau 1**). La localisation cartographique des cours d'eau sélectionnés est présentée sur la **Carte 1** et leur description est détaillée dans le rapport final de l'étude.

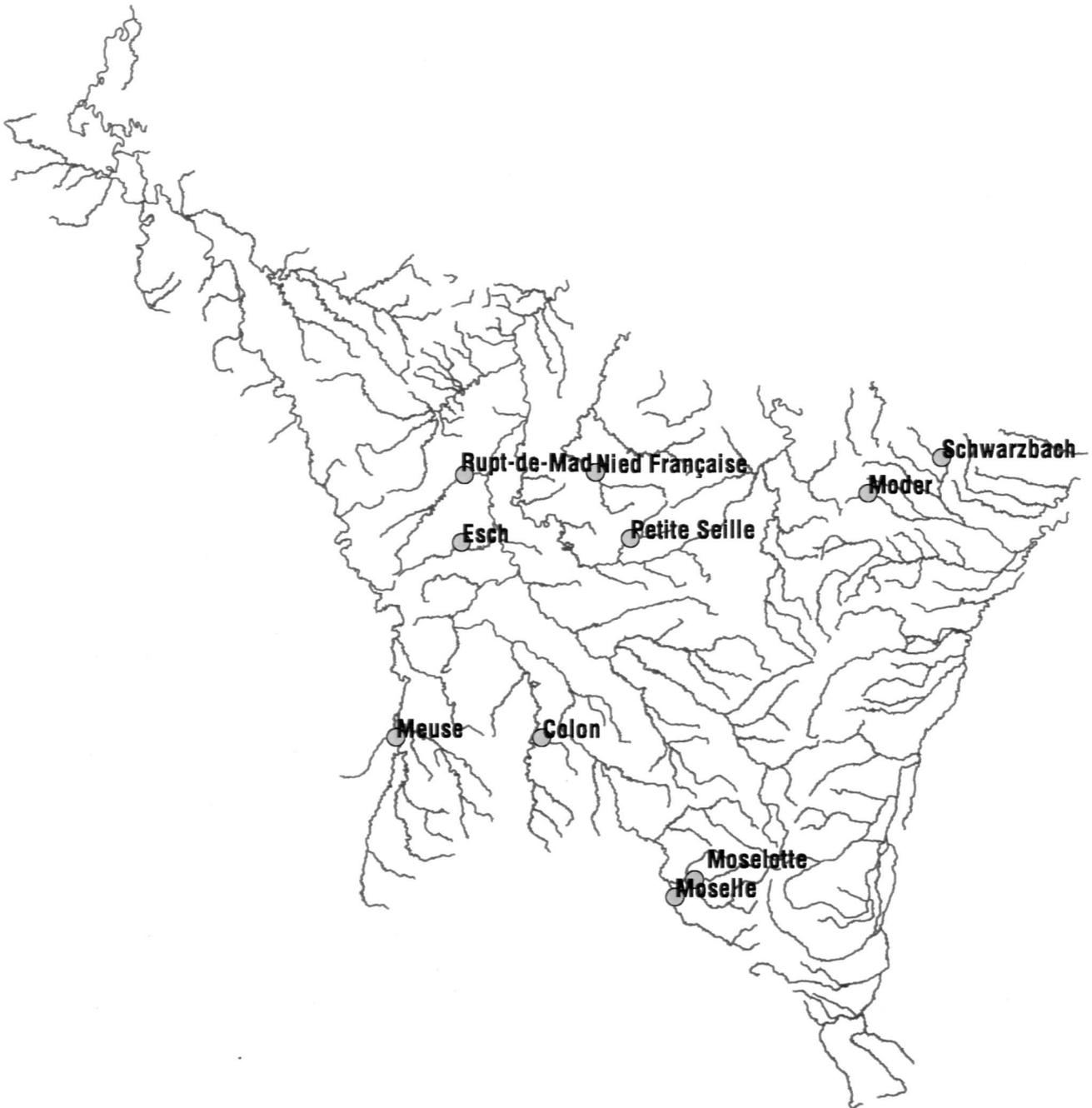
**Tableau 1 - Repérage des cours d'eau sélectionnés**

Substrat géologique et classe de perméabilité	Cours d'eau	Typologie Agence
<i>Grès vosgien, classe de perméabilité P11</i>	Moder	Type 2, ED
	Schwarzbach	Type 2, PN
<i>Argiles-marnes P31</i>	Petite Seille	Type 6, ED
	Nied Française	Type 6, PN
<i>Argiles-marnes P31</i>	Colon	Type 6, ED
<i>Alternance marno-calcaire P2</i>	Rupt de Mad	Type 3
	Esch	Type 3
<i>Alternance marno-calcaire P2</i>	Meuse	Type 5, ED
	Ornain	Type 5, PN
<i>Granites et roches métamorphiques P33</i>	Moselle	Type 2
	Moselotte	Type 2

ED = état dégradé

PN = pseudo naturel

**Etude et Modélisation du Phytobenthos  
dans les différents types de rivières du bassin Rhin-Meuse  
Localisation des stations de prélèvements**



**Carte 1**

## 3 PROTOCOLES

### 3.1 Déroulement de l'étude

Ce travail a été mené de 1996 à 1999. La première année (1996) fut consacrée à une mise au point méthodologique sur les cours d'eau cités ci-dessus. Des campagnes mensuelles (de mars à octobre 1996 et d'avril à octobre 1997) ont permis l'acquisition de données relatives au phytobenthos et à l'influence de certains paramètres environnementaux. Parallèlement, une réflexion concernant la structure et le fonctionnement du sous-modèle mathématique a été mise en place. Durant la dernière année de relevés (1998), un grand nombre de cours d'eau ont été parcourus sur l'ensemble du bassin Rhin-Meuse, afin de recueillir un maximum d'informations sur le type de végétation et les niveaux de biomasse. Quelques campagnes de mesure de production primaire ont été menées pour compléter les données manquantes. De plus, la modélisation du phytobenthos a été affinée.

Le détail des protocoles, matériels et méthodes peut être trouvé dans le rapport final de l'étude.

### 3.2 Choix des stations

Les stations de mesure ont été choisies dans des secteurs dont les caractéristiques abiotiques offraient des conditions optimales de développement pour le phytobenthos (profondeur, éclaircissement, vitesse de courant, ...), et où la biomasse végétale apparaissait être la plus forte.

### 3.3 Analyses physico-chimiques

- Mesures sur le terrain : oxygène dissous ( $\text{mgO}_2/\text{l}$  et  $\%_{\text{sat.}}$ ), température ( $^{\circ}\text{C}$ ) et pH
- Analyses de laboratoire (conductivité, pH,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{P}_{\text{tot.}}$ ), réalisées selon des protocoles normalisés.

### 3.4 Suivi du phytobenthos

#### ▪ Mesure de la biomasse phytobenthique

- Délimitation de la station dans une section suffisamment longue pour tenir compte de son hétérogénéité, et identification des espèces végétales présentes.
- Estimation visuelle du pourcentage de recouvrement total et par espèce du phytobenthos. Réalisation de documents photographiques couvrant la station.
- Mesure de l'épaisseur de la végétation, de la profondeur moyenne
- Prélèvement total des végétaux inclus dans le tronçon délimité (détermination la plus précise possible de la biomasse), égouttage et nettoyage.
- Pesée et détermination du poids frais (PF) de chaque espèce et du PF total, exprimé en  $\text{g}/\text{m}^2$ .
- Séchage au laboratoire d'une fraction aliquote de cette biomasse (calcul de la relation poids frais- poids sec (PS))

#### ▪ Mesures des teneurs en carbone (C), azote (N) et phosphore (P) de plusieurs végétaux, exprimées en % du poids sec.

- Evaluation de **l'hétérogénéité de la répartition spatiale** du phytobenthos et donc la représentativité des stations suivies au cours de trois campagnes de terrain (juillet 1996 pour les 8 cours d'eau étudiés, mai 1997 pour les cours d'eau à renoncules et septembre 1997 pour les cours d'eau à potamot). Relevé de toute la végétation macrophytique en parcourant (à pied ou en bateau) les rivières sur une distance plus ou moins grande (1 à 10 kilomètres) et ce, en amont et/ou en aval des stations étudiées.
- **Mesure de la production primaire** par la méthode d'Odum (1956). Les valeurs enregistrées (oxygène dissous, température de l'eau et ensoleillement) et leurs variations sur des cycles de 24 heures, permettent de calculer la photosynthèse (P), la respiration (R) et le coefficient de réaération ( $K_r$ ), et de déterminer la production primaire brute journalière (PPBJ).
- Des **données générales** concernant le phytobenthos (type de végétation, recouvrement et biomasse), et diverses caractéristiques environnementales (largeur, profondeur, turbidité des eaux, état de la ripisylve) ont été recueillies sur de nombreux cours d'eau.

## 4 RESULTATS

On pourra se reporter au rapport final de cette étude pour consulter l'entièreté des données et observations concernant les résultats de ce travail.

### 4.1 Physico-chimie

De façon générale, les résultats obtenus en 1997 sont très proches de ceux de 1996. Il est intéressant de comparer la physico-chimie des différents types géomorphologiques, à l'aide du **tableau 2** qui reprend les valeurs moyennes observées pour chaque type.

**Tableau 2** - Physico-chimie (valeurs moyennes) par type de cours d'eau.

TYPE	pH	Conductivité	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	P <sub>tot</sub>
GEOMORPHOLOGIQUE		μS/cm	mgN/l	mgN/l	mgN/l	mgP/l	mgP/l
Granites	7.43	82	0.04	0.01	1.17	0.04	0.07
Grès	7.36	102	0.06	0.02	0.62	0.06	0.11
Calcaires	8.1	510	0.03	0.03	2.26	0.17	0.21
Marnes et Marnes-Argiles	8.17	1478	0.11	0.08	3.01	0.27	0.35

Comme attendu, une minéralisation croissante s'observe nettement en considérant successivement les cours d'eau sur granites, grès, calcaires et marnes/argiles. Les concentrations en éléments azotés et phosphorés suivent *grosso modo* la même tendance.

### 4.2 Phytobenthos

L'étude a permis de recueillir un certain nombre de données qui concernent principalement l'évolution qualitative et quantitative du phytobenthos et la prise en compte de l'hétérogénéité de sa répartition par type de cours d'eau, ainsi que la production primaire.

Des données complémentaires, plus développées encore dans le rapport final, ont également permis d'acquérir des informations intéressantes pour la modélisation. Il s'agit :

- du calcul de la **relation poids frais - poids sec**. On constate que le PS représente de 4,35 % (*Callitriche sp.*) à 12,3 % (*Potamogeton pectinatus*) du PF selon l'espèce considérée. Les échantillons des deux années ne montrent pas de différences notables.
- de l'évaluation de la biomasse à partir d'équations basées sur des paramètres simples (pourcentage de recouvrement, épaisseur de la végétation, profondeur), établies à la suite de traitements statistiques appropriés.
- **des teneurs élémentaires des végétaux en C/N/P**. Afin de pouvoir utiliser les mesures de biomasse obtenues sur le terrain (exprimées en g PS/m<sup>2</sup>) dans la modélisation, la connaissance des teneurs en carbone de ces végétaux (exprimées, g C/m<sup>2</sup>) est utile. De plus, étant donné le rôle important du phytobenthos dans le stockage et le relargage des nutriments azotés et phosphorés, l'évolution des teneurs en N et P rencontrées a été suivie dans 17 végétaux différents. Les résultats obtenus sont à interpréter avec prudence, étant donné l'échantillonnage encore limité et la complexité de la problématique. Les teneurs tissulaires moyennes observées sont de 34,1% pour le carbone (23 à 44 % du PS), 3,8% (de 2,4 à 4,9 % du PS) pour l'azote et 0,6% (de 0,3 à 1,35 % du PS) pour le phosphore. Les rapports C/N et C/P semblent varier en fonction du stade de développement des végétaux. De plus, les rapports C/N moyens de la biomasse végétale par cours d'eau sont très stables, ce qui indique sans doute que la croissance des végétaux n'est en aucun cas limitée par l'azote dans les cours d'eau étudiés. Par contre, un rapport C/P moyen dans la Moselle plus élevé que dans les autres rivières indique peut-être dans cette rivière, une limitation de la croissance des macrophytes par le phosphore.

#### 4.2.1 Evolution quantitative et qualitative du phytobenthos par type de cours d'eau

Les profils des évolutions annuelles de la biomasse en 1996 et 1997, exprimées en g PS/m<sup>2</sup>, peuvent être comparés pour chaque cours d'eau étudié (voir fiches par cours d'eau ci-après). L'absence de certaines données, liée à des débits élevés, a été comblée par extrapolation des valeurs manquantes.

Trois grands types de dynamique de la végétation aquatique semblent se dégager de l'ensemble de ces observations :

- **à développement précoce** : cette végétation est observée dans les cours d'eau sur calcaires (*Ranunculus fluitans*). La biomasse peut déjà être très élevée en février-mars (sauf en cas de crues hivernales importantes) ; le maximum est alors atteint en avril-mai et la biomasse diminue ensuite progressivement pour augmenter à nouveau en septembre-octobre.
- **à développement printanier** : ce genre de végétation est observé dans les cours d'eau sur grès et granites (*Ranunculus peltatus* et *R. penicillatus*). Les biomasses présentes à la sortie de l'hiver sont faibles et un développement débute véritablement à partir du mois d'avril pour atteindre le maximum vers la mi-juin. Ensuite la régression est progressive et en septembre, les biomasses sont à nouveau faibles.
- **à développement tardif** : végétation que l'on retrouve dans les cours d'eau sur marnes et marnes-argiles et mettant en jeu le *Potamogeton pectinatus* dont les biomasses maximales sont observées à l'automne.

## Cours d'eau sur marnes et marnes-argiles

### PETITE SEILLE

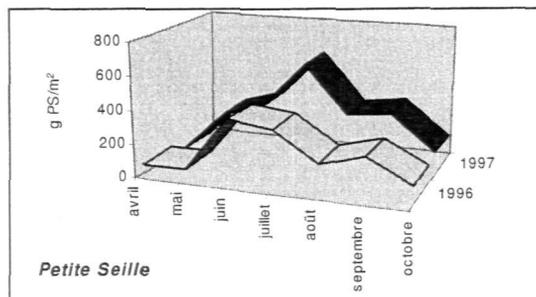
#### Composition floristique :

- potamot pectiné (*Potamogeton pectinatus*), potamot crépu (*P. crispus*),
- myriophylle (*M. spicatum*)
- nénuphar (*Nuphar lutea*)
- rubanier (*Sparganium emersum*)

**Séquence de développement :** Ce type de cours d'eau présente une végétation aquatique sans espèce réellement dominante. Les espèces citées sont responsables des biomasses les plus fortes. Toutefois, le potamot pectiné se distingue sensiblement par ses biomasses un peu plus élevées qui s'observent sur une plus longue période (trois mois).

#### Evolution des biomasses :

La **figure 1** montre une évolution des biomasses pour 1996 et 1997 assez semblable avec un développement de biomasses plus élevées en 1997 (max. de 601 g PS/m<sup>2</sup> contre 382 g PS/m<sup>2</sup> en 1996).



### NIED FRANÇAISE

#### Composition floristique :

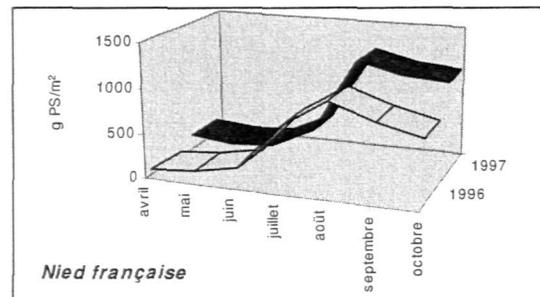
L'essentiel de la végétation aquatique de la Nied est, mis à part le nénuphar, représenté par le potamot pectiné en herbiers très denses.

#### Séquence de développement :

- faible au printemps (développement des nénuphars, de biomasse peu importante)
- développement de potamot pectiné sous forme d'herbiers denses à partir de juillet, se maintenant jusqu'à la fin octobre.

#### Evolution des biomasses :

Les biomasses atteignent des valeurs extrêmement élevées (supérieures à 1000 g PS/m<sup>2</sup>) à partir du mois d'août se maintenant en septembre et octobre. L'évolution pour 1997 est similaire à celle observée en 1996 (**figure 1**).



**Figure 1 :** Evolution de la biomasse dans la Pte Seille et la Nied française (1996-1997)

### COLON

**Composition floristique :** Ce cours présente une variante par rapport à la Nied :

- dominance du potamot pectiné
- développements algaux (cladophores et vauchéries).

#### Séquence de développement et évolution des biomasses :

- avril-mai-juin : présence possible (selon le régime des débits) de biomasses faibles à moyennes liées au développement d'algues (cladophores et vauchéries);
- juillet-août : apparition et croissance du potamot pectiné;
- septembre-octobre : forte biomasse de potamot pectiné.

Des biomasses importantes de potamot pectiné apparaissent en août, atteignant de fortes valeurs de biomasse en septembre et octobre.

## Cours d'eau sur calcaires et marno-calcaires

### MEUSE

#### Composition floristique :

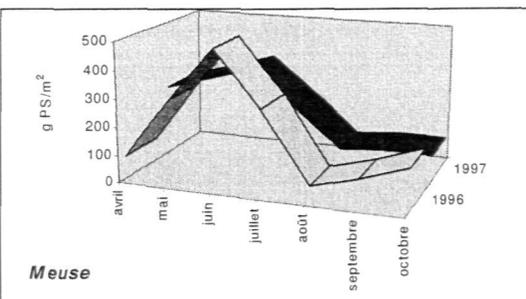
- principalement herbiers de renoncules flottantes (*Ranunculus fluitans*),
- macroalgues : cladophores et vauchéries;

#### Séquence de développement :

- mars : herbiers bien développés de renoncules, avec des cladophores et des vauchéries;
- avril-mai-juin : développement des renoncules;
- juillet-août : déclin des renoncules et développement des vauchéries;
- septembre : renoncules en décomposition et développement de vauchéries, parfois d'entéromorphes
- octobre : légère repousse des renoncules (forme hivernale).

#### Evolution des biomasses :

Elle est très semblable au cours des deux années (**figure 2**), avec toutefois des valeurs légèrement plus importantes en 1996 au maximum de développement (juin-juillet).



### ORNAIN

#### Composition floristique :

- principalement des renoncules flottantes (*Ranunculus fluitans*),
- macroalgues (vauchéries),
- fontinales,

#### Séquence de développement :

- mars : déjà de fortes biomasses de renoncules accompagnées de vauchéries et fontinales;
- avril-mai-juin : herbiers de renoncules atteignent leur maximum;
- juillet-août : déclin des renoncules, développement des vauchéries;
- septembre-octobre : biomasses non négligeables de vauchéries et repousse des renoncules

#### Evolution des biomasses :

La **figure 2** montre une opposition bien marquée dans l'évolution et les valeurs de biomasse en 1996 et 1997 (207 g PS/m<sup>2</sup> en 1997 contre 450 g PS/m<sup>2</sup> en 1996). Ceci s'explique par l'influence de l'épisode de forte crue de l'hiver 96-97 sur le retard de développement en 1997 des renoncules.

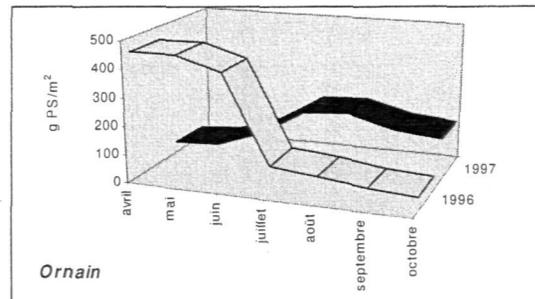


Figure 2 : Evolution de la biomasse de la Meuse et de l'Ornain (1996-1997)

### RUPT-DE-MAD et ESCH

#### Composition floristique :

Le Rupt-de-Mad se rapproche du type de végétation de la Meuse (*Ranunculus fluitans*, *Potamogeton perfoliatus*, *Cladophora sp.* et *Vaucheria sp.*), avec des maxima de biomasses de renoncules en avril-mai (480 g PS/m<sup>2</sup>).

L'Esch possède des peuplements végétaux peu comparables (*Oenanthe fluviatilis*, *Glyceria fluitans*, *Apium nodiflorum*, *Callitriche spp.*, *Berula erecta*, *Fontinalis sp.*), avec des valeurs de biomasses les plus élevées observées jusqu'en juin (maximum de 277 g PS/m<sup>2</sup>).

**Cours d'eau sur grès**

**SCHWARZBACH**

**Composition floristique :**

- renoncules (*Ranunculus peltatus*),
- callitriches (*Callitriche obtusangula*, *C. platycarpa* et *C. hamulata*)
- élodées (*Elodea nuttallii*), ne formant jamais de fortes biomasses.
- présence ponctuelle de fontinales (*Fontinalis antipyretica*) et de vauchéries (*Vaucheria sp.*).

**Séquence de développement :**

Les années 1996 et 1997 sont similaires sur le plan qualitatif (mêmes espèces, phénomènes identiques).

- mars-avril : les callitriches forment quelques herbiers. Elles sont accompagnées par les élodées et les renoncules (pieds de petite longueur) mais les biomasses restent faibles;
- mai-juin-juillet : fort développement des renoncules;
- août-septembre-octobre : décomposition des herbiers de renoncules et développement relativement important des callitriches.

**Evolution des biomasses :**

Les années 1996 et 1997 montrent des différences significatives (**Figure 3**). On constate en effet, dès le mois de mai 97, un développement de biomasse important (jusqu'à cinq fois plus élevée en août), qui chute ensuite en septembre et octobre, alors qu'elle se maintenait à des valeurs moyennes en 1996.

**MODER**

**Composition floristique :**

- principalement des herbiers de renoncules (*Ranunculus peltatus*) et de callitriches (*Callitriche obtusangula*, *C. platycarpa* et *C. hamulata*)
- quelques pieds d'élodées (*Elodea nuttallii* et *E. canadensis*). En automne, des lentilles d'eau (*Lemna minor*)

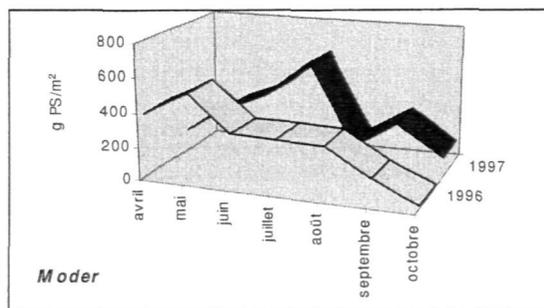
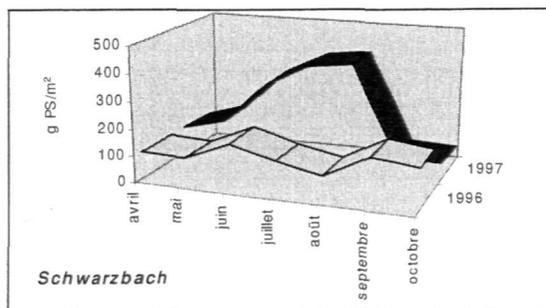
**Séquence de développement :**

- avril-mai-juin-juillet : développement important des herbiers de renoncules et présence non négligeable des callitriches;
- août : déclin des renoncules et développement des callitriches;
- septembre-octobre : essor des callitriches et présence de lentilles d'eau en bordure.

**Evolution des biomasses :**

Comme pour le Schwarzbach, l'évolution des biomasses est quelque peu différente en 1996 et 1997 (**Figure 3**) : le pic de biomasse lié au développement des renoncules apparaît décalé (juillet en 1997 contre mai en 1996). De plus, une chute importante est observée en août 1997. Les biomasses plus fortes mesurées en automne 1997 peuvent s'expliquer par l'ensablement anormal du fond de la rivière constaté en automne 1996 (vidange d'étangs).

**Figure 3 :** Evolution de la biomasse macrophytique dans le Schwarzbach et la Moder (1996-1997)



**Cours d'eau sur granites****MOSELLE et MOSELOTTE****Composition floristique :**

herbiers importants de renoncules à pinceaux (*Ranunculus penicillatus*) accompagnées par des callitriches de faibles biomasses.

**Séquence de développement :**

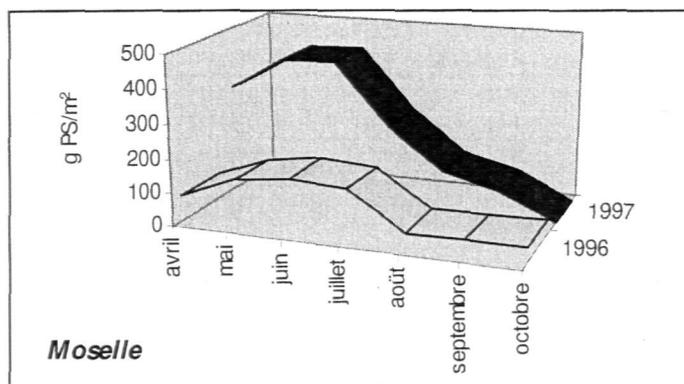
- d'avril à juin : croissance printanière des renoncules et pic de biomasse atteint en juin;
- juillet-août : disparition progressive des herbiers de renoncules (plus ou moins rapide selon les débits);
- septembre-octobre : développement de petits herbiers de callitriches.

**Evolution des biomasses :**

La Moselle a été suivie durant deux années alors que la Moselotte, jugée peu différente, n'a été suivie que la première année. La comparaison 1996-1997 montre (**figure 4**) pour la Moselle un profil similaire pour les deux années mais des biomasses très nettement supérieures en 1997 (biomasse maximale de 420 g PS/m<sup>2</sup> en 1997 contre 160 en 1996), pouvant s'expliquer par les très faibles débits du début d'année 1997.

Les profils obtenus en 1996 pour la Moselle et la Moselotte sont très semblables quant à la séquence d'événements mais présentent une légère différence des valeurs de biomasse (toujours plus élevées dans le cas de la Moselotte).

**Figure 4 :** Evolution de la biomasse de la Moselle (1996-1997)



#### 4.2.2 Production primaire

Les mesures de production primaire brute journalière effectuées permettent d'associer à une valeur de biomasse donnée une certaine production, relation intéressante pour la modélisation du phytobenthos. Le suivi mensuel de la production primaire brute journalière (PPBJ), a été réalisé sur tous les cours d'eau retenus sur une période de deux ans.

Dans la plupart des cas, les valeurs de production obtenues pour l'ensemble des cours d'eau suivent bien l'évolution des biomasses. Les valeurs maximales de production obtenues (30-35 mg O<sub>2</sub>/l.j) sont comprises dans les gammes couramment citées dans la littérature.

#### 4.2.3 Hétérogénéité des cours d'eau

L'importance relative de chaque classe de recouvrement permet d'apprécier l'hétérogénéité de la colonisation végétale de chaque cours d'eau et de visualiser les différences observées entre 1996 et 1997.

La comparaison 1996-1997 indique une modification sensible de la distribution des classes de recouvrement pour deux cours d'eau, la Moselle et la Nied française. Ainsi constate-t-on, pour ces rivières, une diminution des secteurs peu végétalisés au profit de secteurs bien végétalisés. Ceci semble indiquer que les années 1996 et 1997 ont été favorables à une progression de la colonisation de la végétation aquatique dans ces deux cours d'eau. Les autres rivières n'ont pas montré d'évolution semblable.

Si l'on analyse les situations pour chaque rivière, on remarque des différences notables (**tableau 3**). L'ensemble de ces informations peut mener à une estimation du recouvrement moyen sur un kilomètre de cours d'eau .

**Tableau 3 : Recouvrement macrophytique moyen par type de cours d'eau**

Rivière	Degré de végétalisation	Recouvrement moyen (%)
<b>Schwarzbach</b>	46 % linéaire : < 15%rec.	32
<b>Moder</b>	60 % linéaire : > 75 % rec.	72
<b>Petite Seille</b>	57 % linéaire : 30-50% rec.	49
<b>Nied française</b>	49% linéaire à vég. moy. à fort (1996) 78% linéaire à vég. moy. à fort (1997)	43
<b>Colon</b>	28% linéaire peu ou pas végétalisé 67% linéaire à végétalisation moy.	36
<b>Meuse</b>	50% linéaire sans végétaux 50% linéaire végétalisé ds toutes classes	25
<b>Ornain</b>	82 % linéaire bien végétalisé	51

### 4.3 Données générales

L'ensemble des données recueillies sur le terrain concernant le phytobenthos et les caractéristiques environnementales ont permis la réalisation d'un ensemble de cartes dont deux exemples sont présentés sur les **Cartes 2 et 3**.

#### 4.3.1 Carte "Type de végétation" (carte 2)

Pour établir cette carte, nous avons défini cinq types de phytobenthos :

1. **BRYOPHYTES** : Végétation aquatique essentiellement composée de bryophytes (avec parfois présence de callitriches mais ne présentant pas une forte biomasse). Ce type correspond principalement aux parties amont forestières des cours d'eau gréseux, granitiques et calcaires.
2. **MACROALGUES** : Végétation aquatique représentée par un certain nombre d'algues macroscopiques fixées, principalement cladophores, vauchéries et entéromorphes. On les observe fréquemment sur de nombreux types de cours d'eau à substrat grossier, parfois en compagnie ou en alternance avec les végétaux supérieurs comme les renoncules et les potamots.
3. **RANUNCULUS FLUITANS** : Végétation aquatique principalement représentée par des herbiers de renoncules flottantes. De nombreuses espèces peuvent accompagner ces herbiers (nénuphars, fontinales, glycéries, lentilles d'eau, potamot perfolié, entéromorphes, cladophores, vauchéries, etc.). Ce type se rencontre typiquement sur les cours d'eau de nature calcaire. Il peut parfois être également observé dans les parties aval de cours d'eau gréseux.
4. **RANUNCULUS PELTATUS, R. PENICILLATUS** : Végétation aquatique principalement représentée par des herbiers de renoncules à pinceaux ou de renoncules peltées. Parmi les espèces accompagnatrices, se rencontrent les callitriches, élodées et divers bryophytes. On rencontre cette végétation exclusivement sur les cours d'eau granitiques et gréseux.
5. **POTAMOGETON PECTINATUS** : Végétation aquatique principalement représentée par des herbiers de potamot pectiné. Parmi les espèces accompagnatrices, se trouvent les nénuphars, les rubaniers, le potamot crépu, les myriophylles. Ce type de phytobenthos peut être observé dans les cours d'eau marno-argileux.

La carte (**carte 2**) obtenue confirme la relation existant entre la typologie géomorphologique des cours d'eau (Zumstein *et al.*, 1989 ; Agence Rhin-Meuse, 1994) et le type de phytobenthos (Grasmück *et al.*, 1993), malgré quelques cas particuliers comme les cours d'eau **marno-argileux** du bassin du Rhin, assez différents de leurs correspondants du bassin de la Moselle par leur flore aquatique et leurs substrats. Les cours d'eau marno-calcaires et calcaires comme le Rupt-de-Mad, l'Orne et les petits affluents de la Meuse peuvent également présenter des types de végétation aquatique assez dissemblables.

#### 4.3.2 Cartes des biomasses phytobenthiques (carte 3)

La **carte 3** reprend les observations semi-quantitatives réalisées sur le terrain, à partir de l'inventaire extensif réalisé en 1998. Les estimations d'abondance sont basées sur des équations tenant compte du recouvrement végétal et de l'épaisseur de la végétation.

Des cartes complémentaires prenant en compte différentes caractéristiques environnementales (largeur du cours, état de la ripisylve, turbidité de l'eau...) pouvant influencer de façon notable les développements végétaux, ou des cartes plus spécifiques comme la carte « Macroalgues », illustrent de plus le rapport final de l'étude.

**Etude et Modélisation du Phytobenthos  
dans les différents types de rivières du bassin Rhin-Meuse**

**Répartition des types de végétation, caractérisés  
par les espèces de macrophytes dominantes  
(observations de terrain)**



- |                              |   |
|------------------------------|---|
| — Non inventorié             | — <i>Ranunculus peltatus/penicillatus</i> |
| — Bryophytes                 | — <i>Potamogeton pectinatus</i>           |
| — <i>Ranunculus fluitans</i> | — Autres                                  |

**Etude et Modélisation du Phytobenthos  
dans les différents types de rivières du bassin Rhin-Meuse**

**Biomasse totale des macrophytes,  
évaluée d'après les estimations de recouvrement  
(observations de terrain)**



Unités:  $\text{gC}/\text{m}^2$

— Non inventorié	— 80 - 160
— 1 - 40	— > 160
— 40 - 80	

## 5 MODELISATION

Le modèle PEGASE a été développé afin d'orienter les choix en matière de gestion des eaux par le calcul prévisionnel et déterministe de la qualité des eaux en fonction des apports et rejets polluants, dans des conditions hydrologiques diverses. PEGASE permet ainsi de comparer des scénarios afin de dégager des politiques optimales. Il est prévu pour être utilisé suivant deux modes de fonctionnement :

- le mode stationnaire, pour simuler des situations hydrométéorologiques caractéristiques (par exemple débits d'étiage de retour 1/5) ; cette version est opérationnelle et est installée à l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse ;
- le mode non-stationnaire, pour simuler sur des périodes de plusieurs mois ou années avec les conditions hydrométéorologiques réelles ; cette version est en cours de développement et n'est pas encore totalement opérationnelle.

La manière dont le phytobenthos est actuellement modélisé dans PEGASE peut être schématisée comme suit :

- des biomasses 'maximales' de phytobenthos ( $\text{g C/m}^2$ ) sont estimées, par tronçon de rivière, sur base essentiellement
  - de la pente du tronçon
  - de la charge en rejets en amont du tronçon
  - éventuellement de la présence de barrages
- l'évolution 'annuelle' de cette biomasse est décrite à l'aide de 'coefficients réducteurs' mensuels (variant de 0 en hiver jusqu'à 1 pour les mois à biomasse maximale);
- l'activité du phytobenthos est estimée à l'aide d'un calcul explicite de la production primaire (en fonction essentiellement de la température et de l'insolation).

L'objet de la présente étude est d'évaluer la faisabilité de l'amélioration de la représentation du phytobenthos dans PEGASE, entre autres :

- en tenant compte explicitement de la typologie des rivières et des types de végétation qui y sont attachés. Ceci permet d'associer à chaque tronçon de cours d'eau un type de végétation, et donc de prendre en considération les différences importantes (biomasse et activité);
- en affinant la représentation de l'évolution des biomasses et de leur activité.

Les résultats des mesures sur le terrain montrent que, si on retrouve généralement bien le même type de végétation dans les mêmes zones, les biomasses atteintes et l'évolution annuelle de celles-ci peuvent varier fortement d'une année à l'autre. Cela est naturellement dû à l'influence des différentes conditions hydrométéorologiques (débits, insolation, températures) annuelles.

L'amélioration de la représentation du phytobenthos a suivi 2 étapes :

- réalisation de simulations non stationnaires de la croissance et de la décroissance du phytobenthos pour les stations d'échantillonnages pour lesquelles les données nécessaires étaient disponibles.
- propositions d'améliorations du modèle 'Phytobenthos' de PEGASE, basées sur les résultats des simulations réalisées et sur l'intégration de l'ensemble des données récoltées lors de l'étude.

Les simulations non stationnaires ont été réalisées à l'aide d'une version préliminaire et simplifiée de PEGASE non-stationnaire, pour les stations d'échantillonnage pour lesquelles suffisamment de données d'entrée étaient disponibles, pour 3 'espèces' de macrophytes représentatives des types de végétation benthique des types de cours d'eau du bassin Rhin-Meuse :

- Ranunculus fluitans* (Meuse)
- Ranunculus peltatus/penicillatus* (Moder, Schwarzbach, Moselle)
- Potamogeton pectinatus* (Nied française, Petite Seille).

### Simulations non stationnaires

Les biomasses sont décrites par des équations différentielles faisant intervenir essentiellement un taux de production et un taux de disparition des macrophytes. Les taux de production et de disparition sont naturellement différents suivant les types de végétation (renoncules, potamot) et selon la typologie des cours d'eau.

Le taux de croissance est en fait le taux de production primaire. Il dépend essentiellement :

- de la température du milieu (ce qui permet de simuler des espèces d'eau froide, pionnières par exemple)
- de la lumière disponible : celle-ci dépend naturellement de l'insolation, mais aussi de la transparence de l'eau qui varie, entre autres, avec les concentrations en matières en suspension et en phytobenthos (auto-ombrage)
- de la réponse du phytobenthos à la lumière (coefficient IK)
- de la disponibilité en nutriments.

Le taux de disparition comprend un taux de respiration, dépendant de la température, et un taux d'arrachage, dépendant de la vitesse du courant.

Afin de réaliser les simulations non stationnaires, un certain nombre de données sont nécessaires. Ce sont essentiellement :

- des données physiques sur les rivières : bassin versant, largeurs, pentes
- des données sur les rejets ayant lieu dans ces rivières (rejets de phosphore pour l'éventuelle limitation de la production),
- des données sur les débits, sur les températures, sur les insolutions.

Ces données ont été, autant que possible, extraites de l'application de PEGASE pour l'Agence de l'eau Rhin-Meuse. Les simulations ont été réalisées pour les années 1996 et 1997. Les résultats suivants sont disponibles :

- biomasses de macrophytes calculées ( $\text{g C/m}^2$ ) et mesurées;
- productions d'oxygène calculées ( $\text{g O}_2/\text{m}^2.\text{j}$ ) et mesurées
- concentrations en phosphates calculées ( $\text{g P/m}^3$ ) et mesurées.

Trois exemples de simulation sont présentés pour la Nied française, la Meuse et la Moselle en 1997 (**figures 5 à 13**). Sur ces figures, sont reprises les biomasses calculées et mesurées, la production primaire (calculée et mesurée) et la respiration des macrophytes ainsi que les concentrations en phosphates (calculées et mesurées); les traits (continus ou pointillés) correspondent aux valeurs calculées par le modèle, et les cercles noirs correspondent aux valeurs mesurées.

Les conclusions que l'on peut tirer de ces simulations sont essentiellement les suivantes :

- la dynamique de croissance et de décroissance des macrophytes est relativement bien rendue, même s'il reste des incohérences ; celles-ci sont compréhensibles étant donné la grande variabilité des phénomènes modélisés et la difficulté d'intégrer les variations de la turbidité, de la nature des substrats et de diversité de la végétation
- les productions calculées sont comparables aux productions mesurées; les grosses différences (par exemple, dans la Meuse) proviennent sans doute de la méthodologie de mesure, qui évalue en fait la production d'oxygène par la végétation en amont du point de mesure ; cela a peu d'incidence dans des cours d'eau à colonisation végétale homogène, mais peut conduire à des incohérences dans le cas des cours d'eau hétérogènes ; par contre, les productions calculées correspondent à des biomasses végétales calculées, multipliées par le recouvrement moyen de la zone amont.
- les concentrations en phosphore sont bien rendues.

Un phénomène non pris en compte par le modèle est l'effet des crues importantes sur la dynamique du phytobenthos. Ainsi, dans la Moselle, il est fort possible que les crues très importantes de 1995 aient érodé le substrat et enlevé une partie de la biomasse « souterraine » des macrophytes : ceci expliquerait les différences considérables de comportement des macrophytes observées dans cette rivière en 1996 et 1997 (**figures 11 et 12**).

PROGRAMME PHYTOBENTHOS : SIMULATION DE REFERENCE NIED FRANCAISE  
 CONCENTRATIONS DANS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE MACROPHYTES G C /M2  
 NIED NIED FR 3 (km 20.0) ANNEE 1997

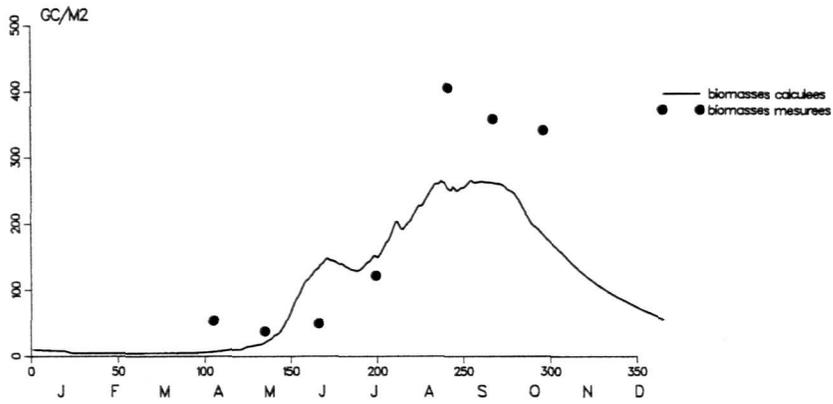


Figure 5

ulg ceme

PROGRAMME PHYTOBENTHOS : SIMULATION DE REFERENCE NIED FRANCAISE  
 PRODUCTION PRIMAIRE ET RESPIRATION MACROPHYTES G02/M2J  
 NIED NIED FR 3 (km 20.0) ANNEE 1997

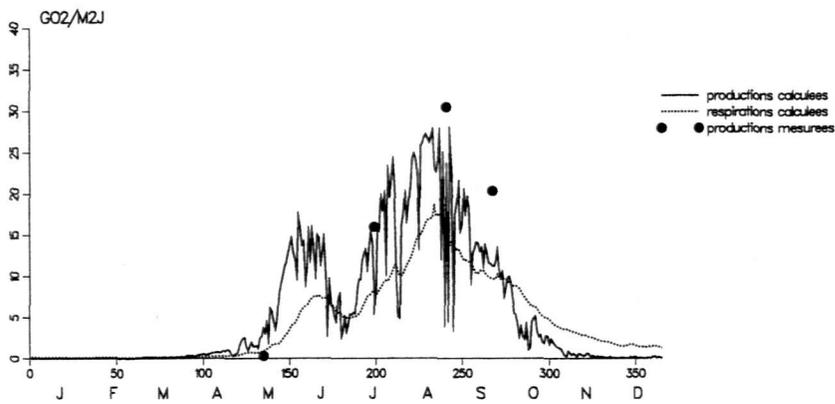


Figure 6

ulg ceme

PROGRAMME PHYTOBENTHOS : SIMULATION DE REFERENCE NIED FRANCAISE  
 CONCENTRATIONS DANS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE ORTHOPHOSPHATES (GP/M3)  
 NIED NIED FR 3 (km 20.0) ANNEE 1997

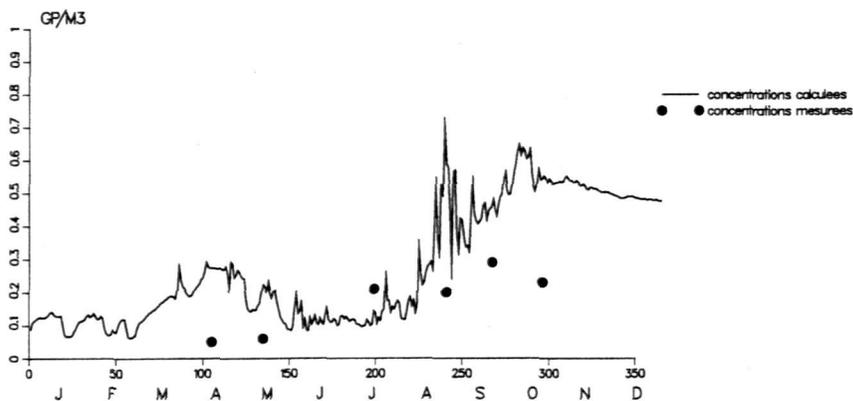


Figure 7

ulg ceme

PROGRAMME PHYTOBENTHOS : SIMULATION DE REFERENCE MEUSE  
 CONCENTRATIONS DANS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE MACROPHYTES G C /M2  
 MEUSE MEUSE 1 (km 70.1) ANNEE 1997

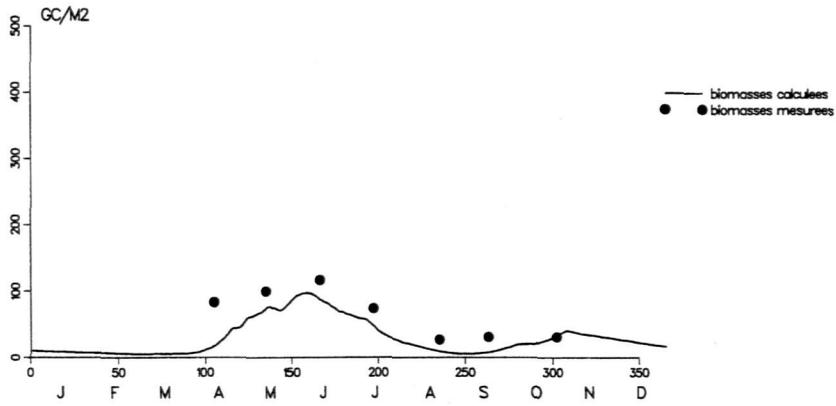


Figure 8

ulg ceme

PROGRAMME PHYTOBENTHOS : SIMULATION DE REFERENCE MEUSE  
 PRODUCTION PRIMAIRE ET RESPIRATION MACROPHYTES G02/M2J  
 MEUSE MEUSE 1 (km 70.1) ANNEE 1997

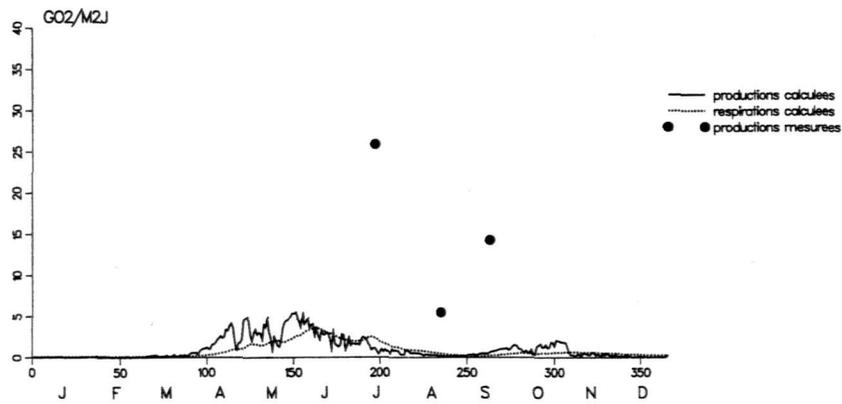


Figure 9

ulg ceme

PROGRAMME PHYTOBENTHOS : SIMULATION DE REFERENCE MEUSE  
 CONCENTRATIONS DANS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE ORTHOPHOSPHATES (GP/M3)  
 MEUSE MEUSE 1 (km 70.1) ANNEE 1997

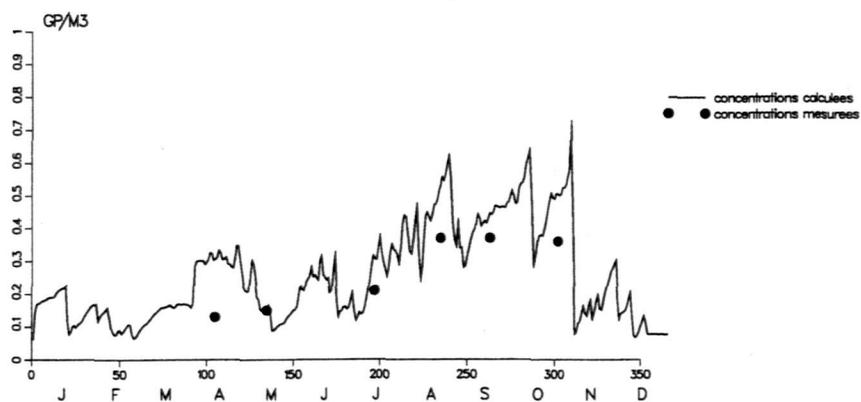


Figure 10

ulg ceme

PROGRAMME PHYTOBENTHOS : SIMULATION DE REFERENCE MOSELLE  
 CONCENTRATIONS DANS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE MACROPHYTES G C /M2  
 PHYTOBENTH MOSELLE 2 (km 37.0) ANNEE 1997

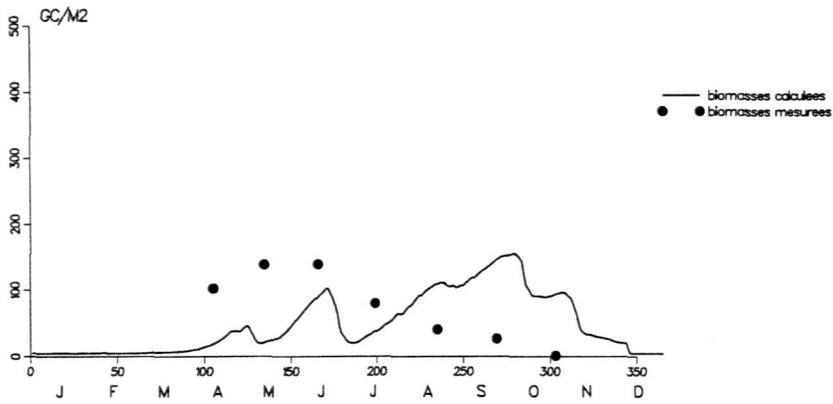


Figure 11

ulg cerne

PROGRAMME PHYTOBENTHOS : SIMULATION DE REFERENCE MOSELLE  
 PRODUCTION PRIMAIRE ET RESPIRATION MACROPHYTES G O2 /M2.J  
 PHYTOBENTH MOSELLE 2 (km 37.0) ANNEE 1997

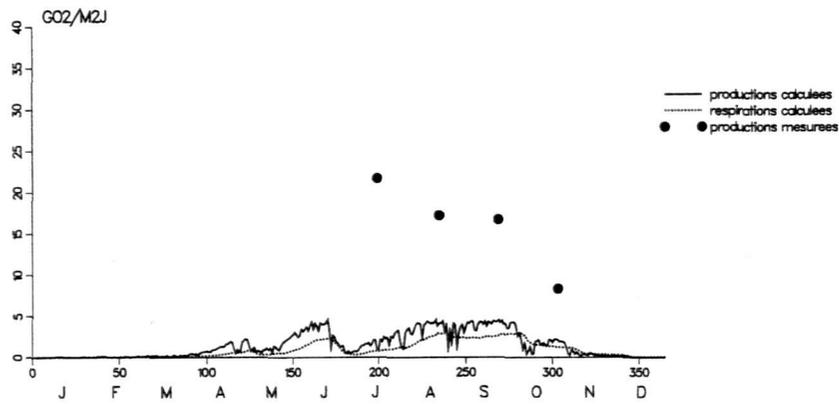


Figure 12

ulg cerne

PROGRAMME PHYTOBENTHOS : SIMULATION DE REFERENCE MOSELLE  
 CONCENTRATIONS DANS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE ORTHOPHOSPHATES (GP/M3)  
 PHYTOBENTH MOSELLE 2 (km 37.0) ANNEE 1997

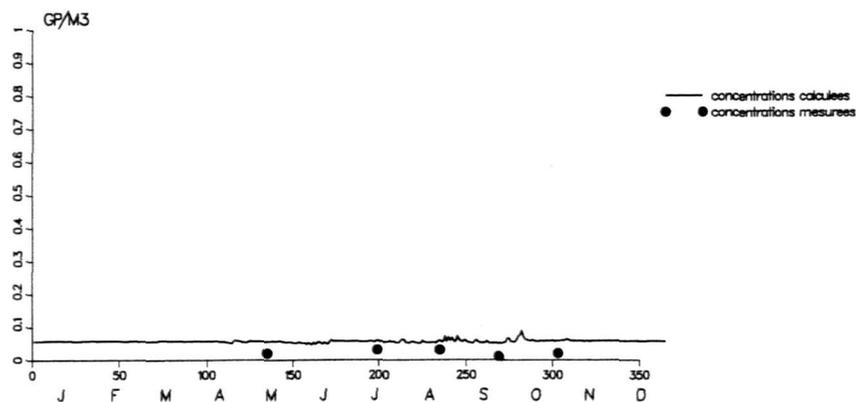


Figure 13

ulg cerne

## 6 DISCUSSION - PERSPECTIVES

### Discussion

D'une façon générale, la présente étude a permis d'améliorer significativement les connaissances sur les aspects quantitatifs sur la végétation macrophytique des rivières du bassin Rhin-Meuse et sur la dynamique de cette végétation. Ces améliorations se situent notamment au niveau des méthodologies (par exemple, évaluation de la biomasse par échantillonnage complet et estimation du recouvrement, la prise en compte de l'hétérogénéité de la colonisation végétale). Enfin, ce travail a démontré la faisabilité du développement d'une modélisation non-stationnaire du phytobenthos au sein d'un modèle de gestion de la qualité des eaux à l'échelle d'un bassin versant.

Des difficultés persistent cependant, que le programme a permis d'identifier, qui expliquent souvent des écarts entre les résultats des calculs et les observations de terrain :

- les incertitudes sur des variables essentielles comme la turbidité de l'eau, la nature des substrats, la diversité de la végétation dans certains cours d'eau
- les effets des événements hydrologiques extrêmes, qui induisent des discontinuités dans la dynamique de la végétation à long terme
- les limites des connaissances sur l'écophysiologie des végétaux, comme l'assimilation des nutriments et leur utilisation au cours du temps
- les limites de certaines méthodes de mesure, telle que la mesure de la production primaire dans des sections de cours d'eau à colonisation végétale fortement hétérogène

### Perspectives d'amélioration du sous-modèle 'Phytobenthos' de PEGASE

A la suite de cette étude, les améliorations à apporter au sous-modèle 'Phytobenthos' de PEGASE pourraient être les suivantes :

- pour la version actuelle (implémentation stationnaire) :
  - Modéliser non plus une espèce de phytobenthos, mais plusieurs, suivant le type de végétation attendu pour un tronçon donné. On pourrait, dans un premier temps, se limiter aux 3 espèces simulées ici (*Ranunculus fluitans*, *Ranunculus peltatus/penicillatus*, *Potamogeton pectinatus*), mais rien n'empêcherait d'augmenter ce nombre par la suite (bryophytes, ...). Pour chacune de ces espèces, l'estimation des biomasses et des productions (y compris leur évolution annuelle) réalisée lors de cette étude amène déjà une grande amélioration dans la représentation du phytobenthos. Les simulations et mesures ont permis en effet d'obtenir une image réaliste des biomasses et productions réelles dans le bassin Rhin-Meuse.
  - Outre un profil 'annuel' de biomasse représentant une situation typique, le modèle non-stationnaire permet de définir des évolutions annuelles des biomasses pour des années 'spéciales' (année humide, année avec crues estivales, ...), qui pourraient être utilisées.
- A long terme, pour la version non-stationnaire en cours de développement, le sous-modèle de croissance pourra être intégré quasi tel quel et permettra d'améliorer la prise en compte de la dynamique du phytobenthos.

## 7 TRAVAUX CITES

- AGENCE de l'EAU RHIN-MEUSE, 1994. Typologie des rivières du bassin Rhin-Meuse. Rozérieulles, Moulins les Metz, 5 p.
- GOSSE Ph. (1989). Influence des végétaux fixés sur la qualité de l'eau du Vair et du Petit Vair en aval de Vittel. Rapport EDF Chatou DER/HE 31/89, n°6, 82 p.
- GRASMUCK N., HAURY J., LEGLIZE L. et MULLER S. (1993). Analyse de la végétation fixée des cours d'eau lorrains en relation avec les paramètres d'environnement. *Annls Limnol.*, 29 (3-4) : 223-237.
- LAFORGE Ph., BADA G. & DESCY J.-P., 1995. Etude de la végétation aquatique (biomasse et production primaire) dans une rivière recevant l'effluent d'une station d'épuration dépourvue de traitement tertiaire. Rapport final A.R. 123, UNECED, FUNDP, Namur, 62 p. + annexes.
- LEGLIZE L., PELTRE M. C. (1990). Etude des végétaux aquatiques sur le bassin amont du Vair (été 1988). Rapport de contrat Agence de l'eau Rhin-Meuse/Laboratoire d'Ecologie de Metz, 25 p. + annexes.
- ODUM, H.T. (1956). Primary production in flowing waters. *Limnol. Oceanogr.*, 1 : 103-117.
- SMITZ J., EVERBECQ E., DELIEGE J.F., DESCY J.-P., WOLLAST R., 1997. PEGASE, une méthodologie et un outil de simulation prévisionnelle pour la gestion de la qualité des eaux de surface. *Tribune de l'Eau* 588 : 73-82
- ZUMSTEIN J.F., GILLE E., DECLoux J.P., PARIS P., PICARD A., 1989. Atlas de la lithologie, perméabilité et sensibilité à la pollution des formations affleurantes du bassin Rhin-Meuse. Agence de l'eau Rhin-Meuse, Moulins les Metz, 20 p.