

Les macrophytes dans les petits cours d'eau (ordres 1 à 5) du bassin de la Seine.

Olivier Dufay¹, Josette Garnier², & Gilles Billen²

¹*FUL, Arlon, Belgique*

²*UMR Sisyphe 7619, CNRS, Paris*

Les macrophytes peuvent, au même titre que le phytoplancton dans les grands axes fluviaux, représenter une nuisance dans les bassins amont, que nous n'avions pas prise en compte dans les deux premières phases du PIREN-Seine. Les macrophytes, outre l'encombrement du lit des rivières, entraînent des variations journalières et saisonnières de l'oxygénation tout à fait spectaculaires : 1) à l'échelle nyctémérale des sursaturations peuvent être observées au cours de la journée en période de maximum de croissance, alors qu'un déficit apparaît la nuit, 2) à l'automne, la biomasse des macrophytes accumulée peut devenir une véritable charge organique consommatrice d'oxygène, à l'origine d'un déficit permanent en oxygène et d'odeurs nauséabondes liées à la décomposition végétale. Il existe ainsi dans les bassins amont de la Seine quelques secteurs à macrophytes.

Afin de compléter les connaissances apportées par le PIREN-Seine sur le problème de l'eutrophisation dans le bassin de la Seine (Garnier *et al.*, 1998), le compartiment des macrophytes devait aussi être étudié avec l'approche de modélisation à grande échelle géographique, désormais bien connue. Ce type d'approche se veut évidemment complémentaire des travaux réalisés ou en cours à des échelles plus locales par l'AESN.

Nous avons dans un premier temps établi un bilan des actions déjà menées. Les informations, souvent qualitatives, nous ont rapidement conduit à réaliser un inventaire à grande échelle, celle des bassins de la Haute Marne et de la Blaise, par des prises de vue en ULM. Cet inventaire (au total, plus de 5000 clichés sur 300-400 km de rivière) a été réalisé au cours des deux années consécutives (1999 et 2000) et a été complété par une « vérité » terrain en 2000. Parallèlement, nous avons élaboré un module mathématique de développement des macrophytes sur la base de données de littérature, mais également à partir de travaux expérimentaux (Dufay, 2000).

Le compartiment des macrophytes constitue donc désormais un élément supplémentaire de l'approche de modélisation RIVERSTRAHLER déjà connue (Billen *et al.*, 1994 ; Garnier *et al.*, 1995 ; Billen & Garnier, 1999 ; Garnier *et al.*, 1999). Outre la validation du modèle sur la base des relevés photographiques et de terrain, et son exploration par des tests de sensibilité, un autre objectif est d'appréhender les macrophytes d'abord comme un élément participant à la biodiversité du système, et, dans les cas d'eutrophisation poussée, comme une nuisance à gérer. C'est pourquoi nous avons testé la réponse du modèle à des facteurs de l'environnement contrôlant le développement des macrophytes (charge en phosphore, lumière, caractéristiques morphologique de la rivière).

1. Les macrophytes du bassin amont de la Marne

La mise en place d'un modèle de développement des macrophytes sur le bassin amont de la Marne nous a conduit à rechercher deux types d'informations.

Nous avons d'une part effectué, en été 2000, une description physique du cours d'eau à partir de relevés de terrain, afin d'appréhender assez finement les contraintes morphologiques. Nous avons également effectué des prélèvements de macrophytes destinées connaître leur nature, ainsi que des prélèvements d'eau qui ont été analysés du point de vue des éléments nutritifs.

D'autre part, deux survols photographiques en ULM ont été réalisés en 1999 et en 2000 sur les mêmes secteurs de la Marne amont, pour appréhender le pourcentage de recouvrement en macrophytes par comparaison avec la situation sur le terrain. Les photographies aériennes ont été en outre utilisées en vue d'effectuer la quantification des taux de végétalisation des berges.

1.1. Campagnes sur la Marne

Les prélèvements, destinées à caractériser les macrophytes présentes sur le bassin amont de la Marne ont été effectuées en juillet et août 2000. Les stations visitées correspondent à des portions de cours d'eau accessibles, où les macrophytes se développent de manière suffisante pour permettre des échantillonnages représentatifs. Ces stations ne sont donc pas nécessairement représentatives des situations rencontrées sur l'ensemble du cours d'eau du point de vue du développement des plantes.

Au niveau des espèces présentes, nous avons pu remarquer la dominance de la renoncule flottante, *Ranunculus fluitans*, parfois accompagnée de quelques autres espèces réputées "envahissantes" (*Potamogeton pectinatus* et *Myriophyllum Spicatum*). Les prélèvements ont permis d'établir une relation entre la surface de plantes et la quantité de biomasse représentée par cette couverture pour différentes espèces (Tableau 1).

Tableau 1. Relation entre la surface de plantes et la quantité de biomasse représentée par cette couverture pour différentes espèces.

	espèces	poids frais, g	poids sec, g	rapport sec/frais	Surface, m ²	poids sec/m ²
1	Pot. Pectinatus	980	72.18	0.0737	0.25	288.71
2	Ran. Fluitans	710	58.02	0.0817	0.25	232.06
3	Pot. Perfoliatus	823	89.23	0.1084	0.25	356.93
4	Ran. Fluitans	1370	120.81	0.0882	0.25	483.25
5	Ran. Fluitans	1269	118.97	0.0938	0.25	475.88
6	Myr. Spicatum	615	57.30	0.0932	0.25	229.19
7	Ran. Fluitans	887	82.06	0.0925	0.25	328.23
8	Myr. Spicatum	453.4	60.13	0.1326	0.25	240.53
9	Ran. Fluitans	1260	126.00	0.1000	0.25	504.00
	Moyennes	929.71	87.19	0.10	0.25	348.75

Les résultats de ces mesures de biomasse conduisent à un rapport "quantité de plantes – surface couverte" d'environ 350 gPS/m² en moyenne. Ce rapport est similaire à celui observé sur la Semois en une même période estivale en août 1996 (340 gPS/m²). Cette relation sera donc utilisée dans le modèle.

1.2. Relevés photographiques

Les deux campagnes de photographie aérienne sur La Marne et la Blaise ont toutes deux été réalisées en août en 1999 et 2000. Il est toutefois important de noter que les conditions hydrologiques étaient très différentes pour ces deux années (49 m³ s⁻¹ en moyenne de mai à août 1999 contre 88 m³ s⁻¹ à la même période en 2000. Par ailleurs, la tempête du 26 décembre 1999 constitue un

élément à considérer avec attention, en raison de l'importance de l'ombrage des arbres sur le développement des macrophytes.

La Blaise a été intégralement photographiée de sa source à la confluence avec la Marne (80 km de rivière). La Marne a été survolée de Rolampont à la confluence avec la Blaise (120 km linéaires). Ces images rendent ainsi possible d'appréhender l'extension des macrophytes à l'échelle du cours d'eau .

Une première observation a montré que la distribution des macrophytes n'était pas régulière le long du cours de ces rivières. En effet, dans le cas de la Marne principalement, les secteurs montrant des développements importants sont assez rares et très localisés. Ils correspondent à des endroits du cours d'eau présentant souvent une largeur importante, une vitesse d'écoulement réduite et une hauteur d'eau faible. Cette situation se rencontre par exemple au niveau de ponts, de confluences...

La végétalisation des berges est bien développée tout le long de ces deux rivières et se caractérise souvent par des arbres de grande hauteur, à l'origine d'un ombrage du cours d'eau non négligeable. Pour la caractérisation détaillée des cours d'eau, un relevé systématique de la couverture des berges gauche et droite a été réalisé sur les photos, avec un pas de mesure correspondant à celui du modèle, le kilomètre.

Chaque tronçon de rivière a été identifié sur les relevés photographiques à partir d'un logiciel de SIG. L'estimation de la couverture des deux berges effectuée sur ces photos permet donc de la représenter suivant un profil en long d'un secteur de la Marne (*Figure 1*).

Végétalisation des berges

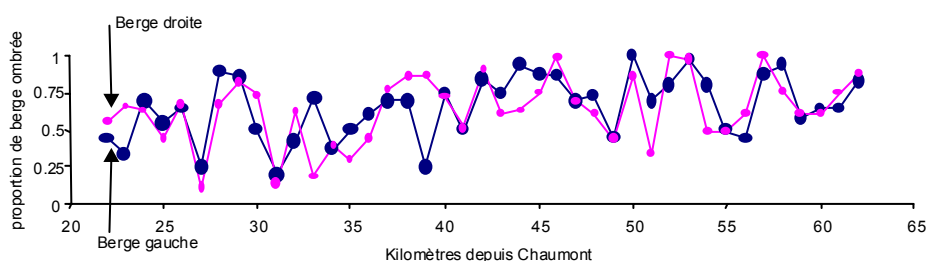


Figure 1: Végétalisation des berges de la Marne (en %, moyennes kilométriques)

Grâce aux données du SIG, nous avons également pu déterminer pour chaque kilomètre de rivière, l'orientation moyenne de l'écoulement. Cette orientation est en effet capitale pour le calcul systématique de l'ombrage généré par la végétation des berges. Une partie des résultats de ces mesures, concernant la portion de cours d'eau présentée à la figure 1, est reprise à la figure 2.

Orientation du cours d'eau

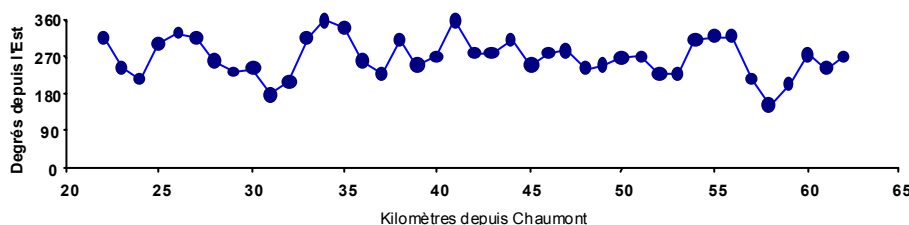


Figure 2: Relevés de l'orientation d'écoulement de la Marne (moyennes kilométriques)

De manière simplifiée, la Marne et la Blaise s'écoulent d'abord du Sud vers le Nord et obliquent ensuite vers l'Ouest. Cette orientation générale implique que la végétation des deux berges influence l'ombrage du cours d'eau.

Du point de vue de la densité en macrophytes, l'analyse des photographies aériennes se montre un peu plus complexe. En effet, ramenée au kilomètre courant de rivière, la proportion de couverture

en plantes est systématiquement très faible, en raison 1) tout d'abord de la densité moyenne de végétalisation des berges élevée pour les deux cours d'eau étudiés, 2) aussi, dans le cas de la Marne principalement, de la hauteur d'eau qui reste relativement importante en toute saison, ce qui conduit à une extinction non négligeable de la lumière disponible pour la croissance des macrophytes.

La photographie (*figure 3*) montre une situation typique rencontrée sur la Marne sur laquelle on peut remarquer la densité de la couverture végétale des berges, ainsi que la relative profondeur de la rivière, peu propice au développement des plantes.



Figure 3 : la Marne, relativement profonde, sans développement de macrophytes.

La croissance des macrophytes est parfois favorisée par les conditions physiques du milieu : quand la rivière s'élargit, la profondeur diminue sensiblement et le taux d'ombrage généré par la végétation des berges s'atténue. Ces situations particulières se rencontrent souvent à proximité immédiate des ponts, des confluences, etc... A ces endroits, le développement peut prendre des proportions importantes et le taux de recouvrement atteint alors des valeurs élevées (Figure 4).



Figure 4 : Vue à proximité d'un pont, montrant une variation locale du faciès de la rivière et un développement des macrophytes

Ramenée à l'échelle du kilomètre de cours d'eau, la proportion de rivière propice au développement des macrophytes reste assez faible. Il est en effet fréquent de ne constater aucune croissance macrophytique importante sur plusieurs kilomètres de cours d'eau.

Signalons ici que les secteurs les plus propices sont aussi souvent les plus visibles. Cette accessibilité élevée (ponts en particulier) est sans doute à la base d'une surestimation de la quantité de plantes présentes sur l'ensemble du cours d'eau. Le relevé systématique, effectué à partir des photographies aériennes par exemple, permet en revanche une évaluation objective de l'extension des macrophytes. Ce type de relevé a été effectué sur la partie de la Marne dont les caractéristiques

d'orientation et de végétalisation des berges ont été présentées ci-dessus (Figures 1 & 2). Le taux de couverture estimé sur l'ensemble de cette portion de rivière (250 photos), longue de 40 km, ne dépasse pas 2.5% en août 2000. Un tiers seulement des diapositives montrent un développement de macrophytes. Comme déjà signalé, la croissance des plantes aquatiques n'a pratiquement lieu qu'au niveau des ponts, de petits barrages ou de confluences, zones généralement plus larges et moins profondes (Figure 5).

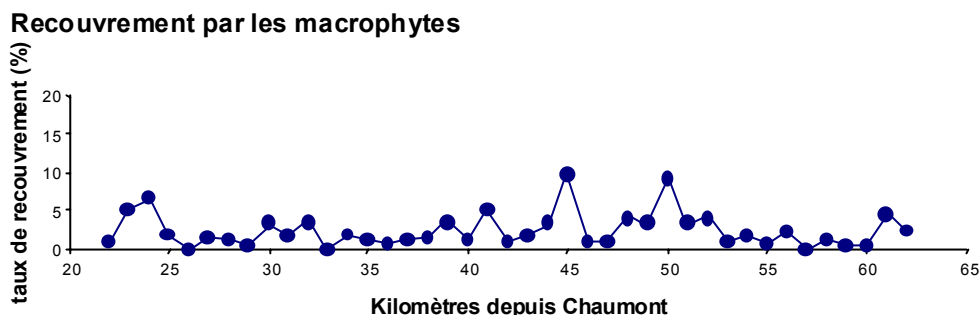


Figure 5 : *Densité en macrophytes sur un secteur de 40 km de Marne (en % de couverture, moyennes par kilomètre)*

L'importance du contrôle de la croissance des macrophytes par les caractéristiques morphométriques de la rivière (largeur, profondeur...) conduit à une comparaison de ce dernier graphique avec ceux des figures 1 & 2: il n'apparaît pas de coïncidence évidente entre les caractéristiques d'ombrage du cours d'eau et le développement des plantes à l'échelle du kilomètre de rivière.

Cette faible colonisation du cours principal de la rivière ne doit cependant pas nous conduire à négliger le développement des macrophytes à l'échelle du bassin. En effet, l'observation des photographies aériennes nous a montré que, dans les annexes des cours d'eau telles que les dérivations ou les bras morts, la croissance macrophytique pouvait prendre des proportions beaucoup plus importantes (Figure 6). Ces développements sortent du cadre de notre travail et nécessiteraient sans doute une attention particulière dans le futur.



Figure 6 : *photo représentant un cours principal de rivière et une annexe encombrée par les macrophytes*

1.3. Effets de la tempête de décembre 1999

L'épisode de tempête observé fin 1999 a été à la base d'une destruction massive d'arbres sur le territoire français. Disposant de photographies aériennes des cours d'eau obtenues avant et après cet

événement particulier, nous avons tenté de repérer des effets éventuels au niveau de la végétation des berges. Une disparition, ou une réduction substantielle, de cette végétation pourrait en effet significativement accroître le potentiel de développement des macrophytes en augmentant la proportion de cours d'eau exposée au soleil.

L'observation des photographies n'a pas mis de réelle différence en évidence. Cet état de fait peut sans doute s'expliquer par la situation topographique de la zone concernée. En effet, de par leur situation en fond de vallée, les cours d'eau se montrent relativement protégés des vents extrêmes par le relief avoisinant. La situation pourrait se montrer différente dans le cas d'une plaine alluviale très large, ce qui n'est pas le cas ici.

2. Le modèle des macrophytes de la Marne

Les bases du modèle de croissance des macrophytes utilisé dans cette étude a été mené dans le cadre d'une recherche consacrée au développement de la renouée flottante dans la Semois en Belgique (Dufayt, 2000). Cette recherche a été effectuée en collaboration étroite avec le programme PIREN-Seine, avec pour objectif l'introduction de ce module "macrophytes" dans le modèle écologique RIVERSTRAHLER du réseau hydrographique de la Seine.

Les facteurs responsables de la régulation du développement des macrophytes dans un cours d'eau sont nombreux. Comme pour le phytoplancton (Garnier *et al.*, 1998), la réponse physiologique des macrophytes à ces facteurs de contrôle a été étudiée expérimentalement pour déterminer les cinétiques et leur relation mathématique.

2.1. Quantification des variables de contrôle

2.1.1. La lumière

La lumière constitue sans aucun doute le facteur le plus évident et le plus important contrôlant le développement des organismes photosynthétiques en général, qu'ils soient aquatiques ou non.

Outre le calcul à l'échelle saisonnière de l'ensoleillement incident calculé de la même façon pour le phytoplancton que pour les macrophytes, il faut prendre en compte l'ombrage, variable d'un endroit à un autre du cours d'eau. Cet ombrage peut être engendré par deux phénomènes distincts :

1. l'ombrage par la végétation des berges (plantation d'arbres le long des cours d'eau, déjà proposée comme solution pratique pour réduire le développement des macrophytes, Vander Borgh *et al.*, 1982),
2. l'auto-ombrage, lié à la formation de touffes denses (développement agrégatif).

Afin d'intégrer le phénomène **d'ombrage par la végétation des rives** dans la modélisation, un algorithme de calcul permettant de quantifier l'ombrage a été établi (de 0 en cas d'ensoleillement total à 1 en cas d'ombrage total) en fonction d'une série de variables:

- la hauteur de la végétation détermine la longueur de l'ombre projetée sur la rivière (les deux berges sont ici considérées indépendamment); celle-ci sera déterminée à l'aide des photographies aériennes et des valeurs moyennes sont estimées par kilomètre de rivière, unité de distance utilisée pour les calculs dans le modèle,
- la largeur du cours d'eau déterminera la proportion de celui-ci qui sera ombrée à un moment donné, estimée en fonction de la distance à la source (pk) et utilisée dans le modèle hydrologique,
- la position du soleil va déterminer, en relation avec la hauteur de la végétation riparienne et l'orientation du cours d'eau, la surface ombrée; cette position est calculée à l'aide d'une routine de calcul existante, permettant de déterminer, à n'importe quel moment de l'année, l'angle formé entre la surface de la terre et le soleil, ainsi que l'orientation du rayonnement (programme TRNSYS, 1998).

- l'orientation du cours d'eau se base sur une estimation moyenne de la direction de l'écoulement de la rivière par kilomètre. Un relevé cartographique est nécessaire à cette estimation.

La surface d'ombre projetée sur la rivière peut être obtenue à partir de la hauteur de la végétation de la rive et de l'angle formé entre le soleil et l'horizon (azimut) ainsi que l'angle mesuré entre le soleil et l'axe de la rivière. Il faut aussi différencier les effets des rives gauches et droites, présentant des caractéristiques différentes tant vis à vis de la végétation que par rapport à la position du soleil.

A l'échelle de travail, celle du kilomètre, le calcul de la valeur finale d'ombrage doit encore tenir compte de la proportion de berge présentant une couverture végétale. Lorsque seulement 30% de la berge sont plantés d'arbres.

En ce qui concerne **l'auto-ombrage**, l'atténuation d'intensité lumineuse au sein d'une touffe de plante a été mesurée en utilisant un capteur de rayonnement photosynthétique (type LI-COR), progressivement immergé au sein d'une zone couverte par les plantes au cours d'une journée ensoleillée. La réalisation de nombreuses mesures dans différents massifs de renoncule flottante, a permis de déterminer un coefficient d'extinction lié aux macrophytes elles-mêmes.

L'effet d'auto-ombrage a pour conséquence directe la limitation de l'épaisseur des touffes de renoncule flottante puisqu'à partir d'une certaine profondeur, la quantité de lumière transmise ne permet plus la photosynthèse. On considèrera que la plante se développe sous forme d'une couche d'épaisseur uniforme, de 10 cm d'épaisseur.

S'ajoute comme pour le phytoplancton, l'extinction de la lumière par les matières en suspension. Il faut ici remarquer la différence d'ordre de grandeur entre la valeur du coefficient d'extinction calculée pour l'auto-ombrage des macrophytes (55.9 m^{-1} en cas de grande densité) et celui estimé par la matière en suspension ($\sim 0.5 \text{ m}^{-1}$). Ceci nous montre qu'en cas de présence de plantes, l'ombrage généré par celles-ci sera très significativement plus important que celui causé par la présence de matières en suspension et d'algues dans la colonne d'eau.

2.1.2. La température

La relation à la température est de même type que celle utilisée pour le phytoplancton, c-à-d une demi-gaussienne. Des mesures d'activité de la renoncule flottante à l'aide d'un respiromètre à recirculation, ont permis de déterminer l'optimum de température à 19.7°C et une valeur de l'écart-type de 16°C (Dufay, 2000). Ces valeurs seront utilisées pour la modélisation de la communauté des macrophytes du bassin de la Marne.

2.1.3. Réponse à la teneur en nutriments

L'influence de la concentration en nutriments sur un taux de croissance est déterminée par la relation hyperbolique de "Michaelis-Mentens" décrivant l'évolution du taux de croissance en fonction de la concentration en nutriment. Ce type de relation s'écrit sous la forme :

L'examen de la littérature a permis d'évaluer le taux de croissance maximum à 0.075 j^{-1} avec une constante de demi-saturation (K_p) des macrophytes vis-à-vis du phosphore évaluée à $4.7 \mu\text{gP l}^{-1}$ (Wright et Mc Donnell, 1986). Les macrophytes ne sont donc pas très exigeante vis-à-vis du phosphore. A titre d'exemple, la valeur de K_p , pour les Chlorophycées est de l'ordre de $50 \mu\text{gP l}^{-1}$ (avec toutefois une très large gamme de variation), le taux de croissance étant de 2.4 j^{-1} . Pour les formes assimilables de l'azote, la concentration rencontrée dans les cours d'eau est largement supérieure à la constante de demi-saturation (de l'ordre de $10 \mu\text{gN l}^{-1}$).

2.1.4. Arrachage

L'évolution de l'arrachage des plantes en fonction de la vitesse d'écoulement est un phénomène tout à fait spécifique des communautés fixées. L'arrachage été quantifié par des mesures de terrain

effectuées dans le cadre du travail sur la Semois (Dufayt, 2000). La formulation retenue est la suivante:

$$\text{Taux d'arrachage} = P_{\text{arr}} * [(0.685) + (0.0015) \cdot V^2]$$

Avec :	Arrachage :	Taux d'arrachage (%.j ⁻¹)
	P _{arr} :	Potentiel d'arrachage (0.0004. (biomasse) ²)
	V :	vitesse d'écoulement (cm.sec ⁻¹)

La valeur du taux d'arrachage en fonction du pourcentage de couverture sur la station évolue de manière importante pour atteindre des valeurs supérieures à 100% d'arrachage par jour pour des vitesses d'écoulement de l'ordre de 150 cm/sec (Figure 7).

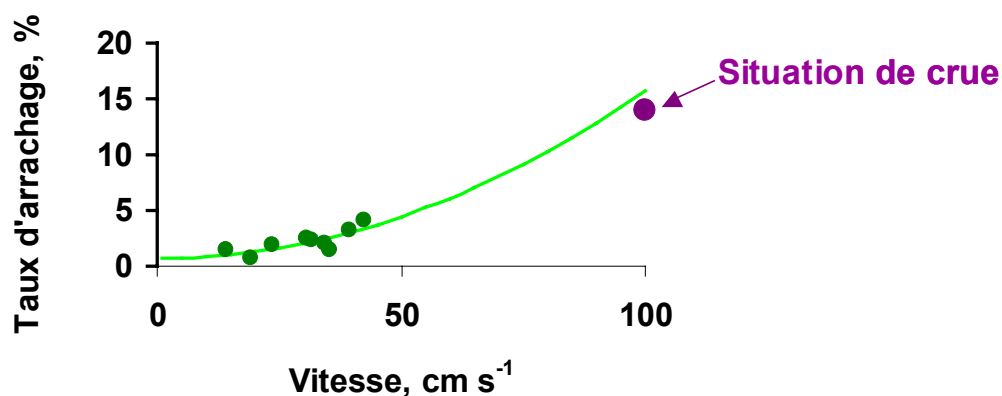


Figure. 7 : Abaque de détermination du taux d'arrachage en fonction de la vitesse du courant et du pourcentage de couverture en renouée flottante

2.2. Construction et validation du modèle

Le schéma simplifié du modèle représentant les relations entre les différents facteurs de contrôle utilisés et la quantité de biomasse présente est présenté à la figure 8¹

¹ Les "forçages" représentent les variables exerçant une influence sur le développement des macrophytes sans subir l'influence de celui-ci (exemple : la température).

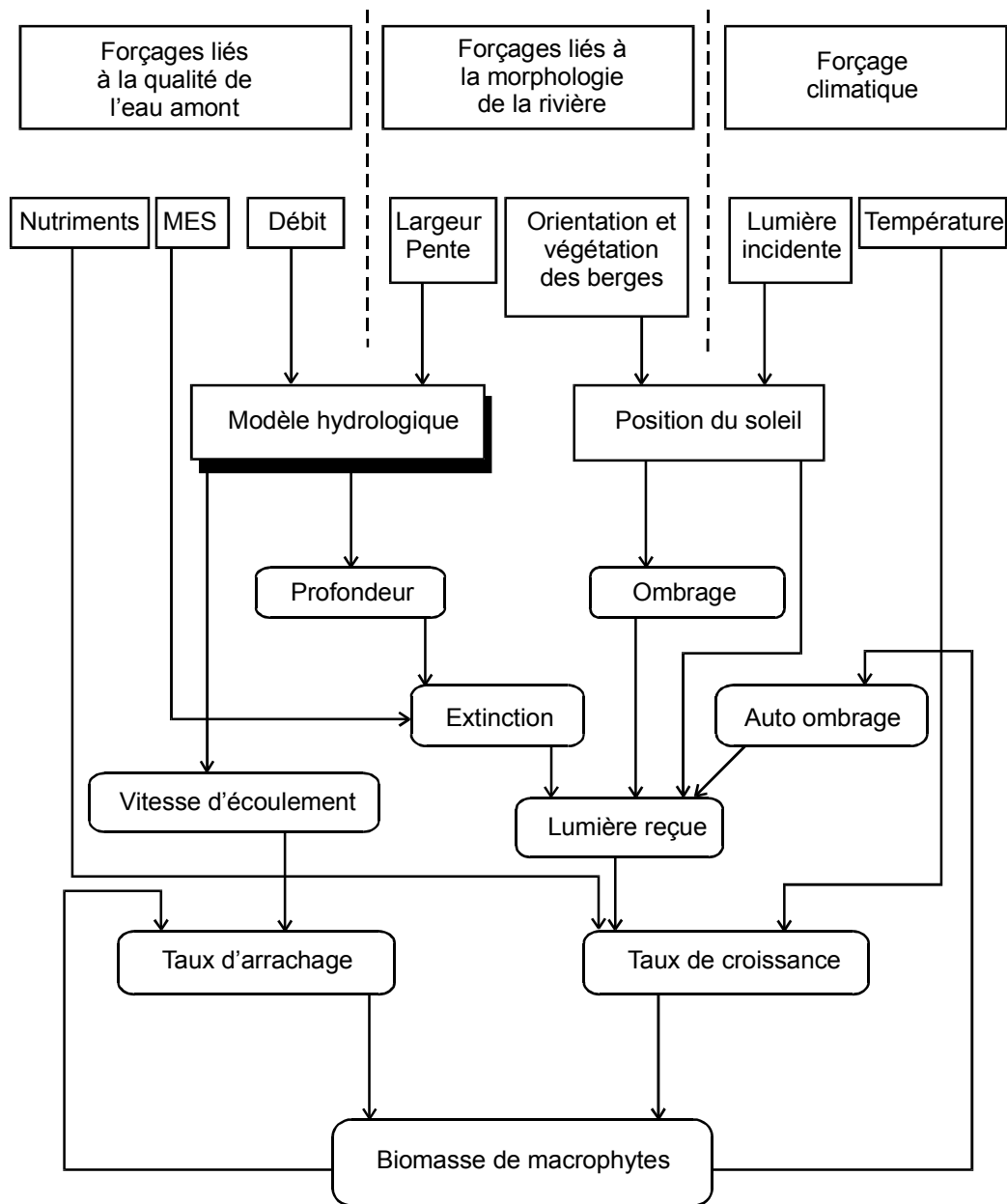


Figure. 8. : Représentation schématique des facteurs de contrôle et de leur influence sur la quantité de biomasse présente

Bien que simplifiée, cette représentation schématique permet de remarquer que l'évolution de la biomasse va être déterminée par deux processus majeurs : le taux de croissance, dépendant de la plupart des variables de contrôle liées au milieu extérieur (T° , lumière, nutriments...), et le phénomène d'arrachage, décrit précédemment, qui se montre capital dans la régulation de la biomasse présente en une station donnée et qui est gouverné à la fois par la vitesse d'écoulement (variable "externe") et par la quantité de biomasse présente (variable "interne").

Le modèle ainsi construit a été utilisé de deux manières différentes. La version utilisée pour la validation et les tests, est une version "**monostation**", qui permet d'effectuer des simulations sur des **portions de cours d'eau réduites**. Cette version monostation a été ensuite intégrée dans le modèle général RIVERSTRAHLER de manière à permettre une utilisation à **l'échelle du cours d'eau**. Ces deux versions présentent donc des objectifs différents tout en reposant sur les mêmes bases de calcul.

2.2.1. Simulations de l'évolution saisonnière de la biomasse de macrophytes

Les premières simulations avec le modèle monostation ont été effectuées sur la rivière Belge, la Semois, puisque la biomasse a été suivie à une échelle saisonnière (Dufay, 2000).

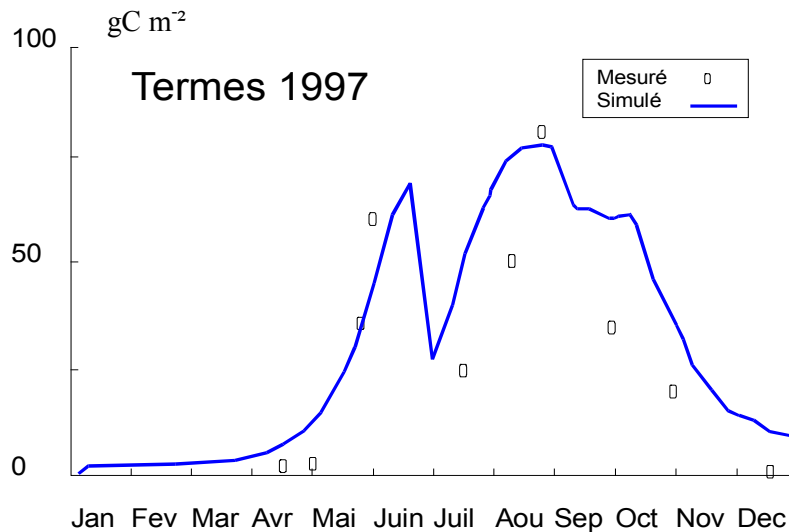


Figure 9 : Simulation de la biomasse de la renoncule flottante à Termes (1997)

L'allure de la courbe de cette simulation de la croissance de la renoncule flottante à la station de Termes en 1997, effectuée à partir des valeurs expérimentales de l'ensemble des paramètres de contrôle, représente de manière satisfaisante les variations de la biomasse estimée sur le terrain. Signalons en particulier les valeurs maximales des pics de biomasse enregistrés durant cette année de mesures, bien simulés par le modèle.

3. Modélisation des macrophytes dans la bassin de la Marne

3.1. Le modèle intégré des macrophytes

L'intérêt du développement d'un modèle de croissance des macrophytes prend tout son sens si on envisage le rôle joué par les plantes aquatiques à une grande échelle de cours d'eau.

Le tracé et la morphologie de la rivière, ainsi que la couverture de ses berges par la végétation, exercent une régulation sur la quantité de lumière disponible et la croissance des macrophytes. L'orientation du cours d'eau joue dans ce cas un rôle important. Les relevés ont été effectués sur le parcours de rivière où la croissance macrophytique est simulée, s'étendant de Chaumont à Larzicourt pour la Marne et de la source à Larzicourt pour la Blaise.

Rappelons que les relevés systématiques effectués à partir des photos aériennes ont permis de déterminer pour chaque tronçon de rivière de 1km, son orientation moyenne et la densité de plantation des berges. Pour chaque secteur, l'orientation globale de l'écoulement et la proportion des berges droite et gauche présentant des arbres susceptibles d'ombrer la rivière ont été également mesurées.

Il faut signaler ici que la densité de la couverture végétale des berges est assez importante. Les valeurs moyennes, sur l'ensemble des deux cours d'eau étudiés, atteignent plus de 75% pour la Blaise et 65% pour la Marne. Ces deux valeurs mettent déjà en évidence le rôle capital de la végétation des berges sur l'écologie des macrophytes de ces deux rivières.

D'un point de vue pratique, le fonctionnement du modèle nécessite le fractionnement du bassin versant étudié en différents sous-bassins modélisés individuellement. Les cours d'eau principaux sont modélisés sous forme d'axes subdivisés en segments de 1 km.

La partie amont de la Marne, de sa source à Chaumont, sera modélisée en un sous-bassin. Le reste du cours de la Marne, de Chaumont à Larzicourt, sera considéré comme un axe sur lequel viendra se greffer le sous bassin du Rognon. La Blaise sera modélisée en axe de sa source à la confluence avec la Marne, à Larzicourt (Figure 10).

Notons que les conditions hydrologiques considérées dans le modèle sont celles de 1995, car nous n'avons pas encore obtenu les valeurs de débits et de pluviométrie des deux dernières années (1999 et 2000).

Le module des processus "macrophytes" introduit dans RIVERSTRAHLER est celui présenté ci-avant, à quelques adaptations près.

1) Dans le modèle "mono-station", la biomasse emportée suite à l'arrachage par le courant était simplement perdue. Dans le modèle général, cette biomasse ne peut être considérée comme disparue puisque celle-ci se décompose, au moins en partie, dans la rivière et relargue des nutriments dans le système. Dans le cas d'une crue soudaine, nos observations de terrain nous ont montré qu'une partie de la biomasse se retrouve exportée du secteur de la rivière sous forme de fragments de plantes qui se déposent sur les bords du cours d'eau ou qui s'accrochent aux obstacles présents à proximité. Cette biomasse est donc bien éliminée sans retour direct de composés vers la rivière. En période plus calme, des fragments de plantes dérivent tels quels et se trouvent souvent accumulés devant des pierres ou des branchages. Une partie des débris végétaux a la possibilité de se décomposer directement dans le cours d'eau. Nous avons choisi de quantifier ce phénomène de la manière suivante. Lorsque de l'arrachage se produit, 25% de la biomasse emmenée se trouve exportée du cours d'eau. La biomasse dérivante se divise alors en deux compartiments, un premier constitué des débris charriés jusqu'à la confluence (1/3), et une quantité restante (2/3) finalement décomposée et source d'un retour de nutriments et de matière organique vers le cours d'eau.

2) La croissance des macrophytes est un phénomène se déroulant de manière statique dans l'espace. Le modèle général travaillant par suivi de masse d'eau, l'intégration de cette biomasse ne peut s'envisager dans ce volume d'eau mobile. Nous avons donc été amenés, lors de l'incorporation du module de croissance macrophytique, à effectuer le calcul de la croissance des plantes pour chaque kilomètre de rivière de manière individuelle. Afin d'intégrer la capture des nutriments dans le bilan en azote et phosphore du cours d'eau, la quantité d'éléments utilisés et relargués par les macrophytes est soustraite ou additionnée à celle de la masse d'eau présente, qui continue sa descente vers l'aval.

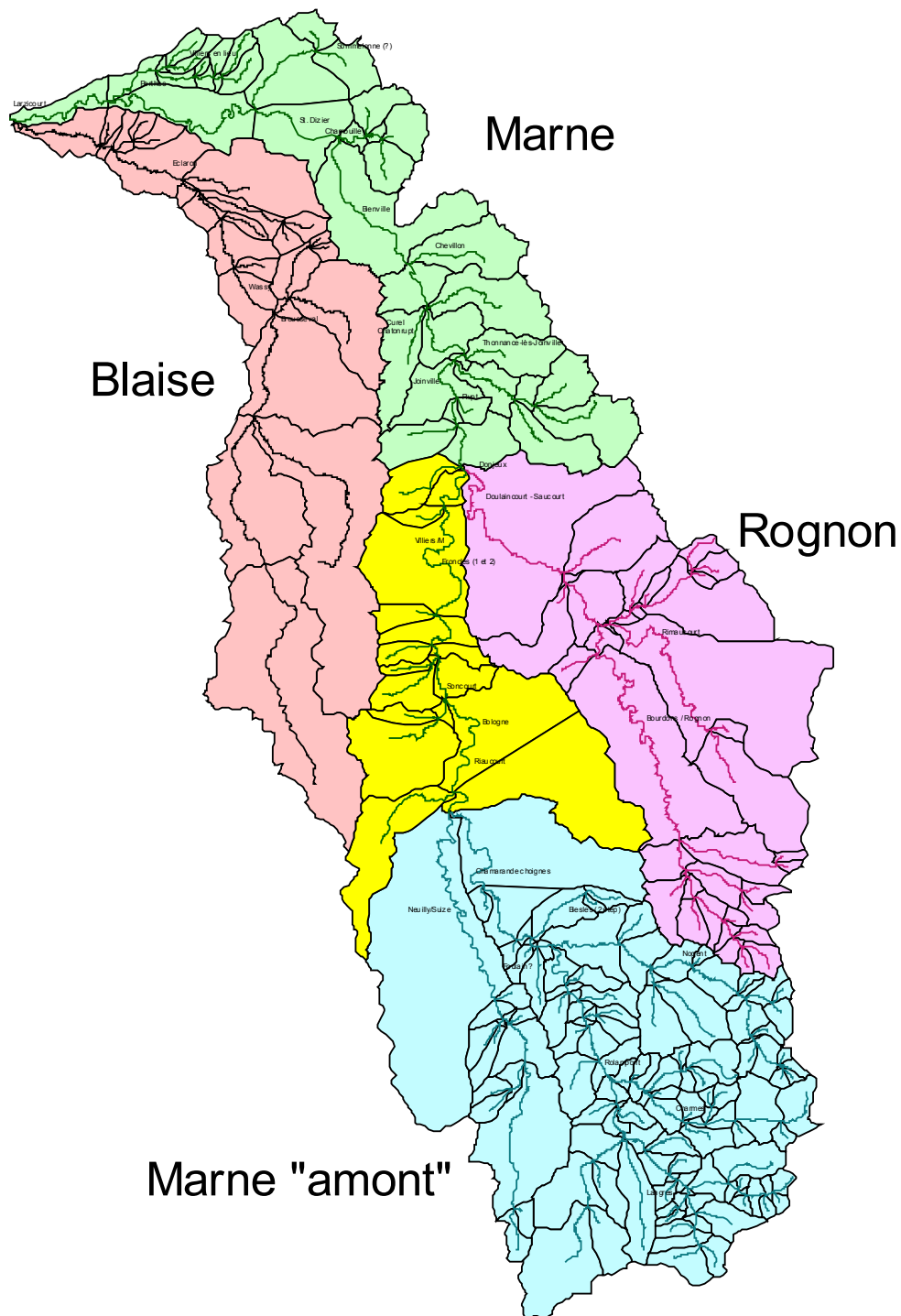


Figure 10 : Carte du bassin versant et découpage pour la modélisation

3.2. Résultats des simulations

Le modèle complet permet d'obtenir des simulations de croissance macrophytique semblables à celles obtenues à l'aide du modèle mono-station. A titre d'exemple, la figure 11 reprend la simulation de la croissance obtenue sur un tronçon de 1 km de rivière exposé au soleil en permanence. Le

maximum de biomasse rencontré atteint ici 80 gC m^{-2} , valeur élevée qui se rencontre lors d'une couverture quasi totale de la rivière par les macrophytes.

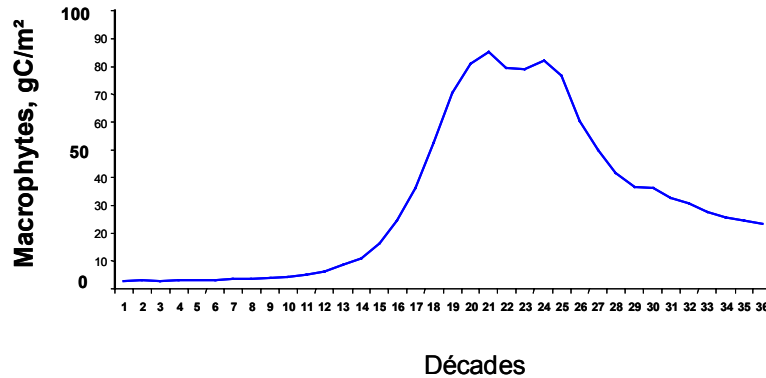


Figure 11 : Simulation de la croissance des macrophytes sur une section sans ombrage pour l'année 1995

La validation du modèle nécessiterait idéalement la comparaison entre une courbe de développement observée et une simulation par le modèle. Cette comparaison n'est pas envisageable puisque nous ne disposons que d'estimations de couverture pour deux situations estivales en 1999 et 2000, et non de suivis saisonniers de biomasse. Dans le cas d'une utilisation plus systématique du modèle, il pourrait être intéressant d'effectuer un suivi du développement annuel des plantes en quelques stations de référence.

En revanche dès que l'hydrologie des années concernées par les relevés photographiques sera connu, il sera possible de comparer les résultats du modèle avec les pourcentages de recouvrement sur l'ensemble du secteur étudiés.

L'intérêt de l'introduction du module "macrophytes" dans le programme RIVERSTRAHLER ne se limite pas à simuler les biomasses des macrophytes, tant à une échelle saisonnière que spatiale. Nous pourrions en déduire le rôle de cette biomasse sur le bilan en nutriments à l'exutoire. Il permettra aussi, par exemple, de tester différentes stratégies de gestion du développement de la végétation aquatique, parfois considéré comme une nuisance.

4. Sensibilité du modèle mono-station à diverses contraintes

A ce stade de l'étude (absence des données sur les conditions hydrologiques), il paraît plus intéressant d'utiliser le modèle mono-station pour explorer, en quelques endroits particuliers (stations de mesure par exemple), la réponse du modèle à diverses contraintes. Cette version du modèle étant très rapide, (quelques secondes), il est très facile à l'aide de cette version du modèle, de quantifier l'effet direct d'une augmentation de l'ombrage ou de la modification de la largeur du cours d'eau, etc... Le modèle visualise alors toute une série de variables calculées :

- La biomasse macrophytique (gC/m^2)
- Le taux de croissance observé (h^{-1})
- Le taux d'arrachage engendré par le courant (h^{-1})
- La profondeur calculée (m)
- La vitesse d'écoulement simulée (m/s)
- La concentration en phosphates ($\mu\text{M/l}$)
- Le facteur de limitation par les nutriments (adim)
- L'ombrage calculé (%)

– Le débit (m³/s)

Les contraintes étudiées seront classées en trois groupes distincts : les caractéristiques morphologiques du cours d'eau, la lumière, et la richesse en nutriments.

4.1. Morphologie

Des modifications de morphologie du cours d'eau se rencontrent régulièrement sur toute rivière. Il peut s'agir d'un élargissement aux abords d'un pont ou d'une modification de la pente par exemple. Ces modifications vont jouer un rôle direct (modification de la vitesse d'écoulement ou de la profondeur) mais aussi indirect (changement de l'effet d'ombrage par la végétation des berges) sur le potentiel de développement des macrophytes.

Un élargissement du cours d'eau va ainsi engendrer un écoulement plus lent, une profondeur plus faible et une réduction de l'effet d'ombrage.

Des simulations systématiques ont été effectuées sur une station hypothétique, située au niveau de Donjeux sur la Marne et dont on ferait varier la **largeur** de 5 à 50m (Figure 12). Une végétalisation des berges de 75% est retenue dans cet exemple, la hauteur des arbres est de 10 m, situation assez courante sur la Haute Marne.

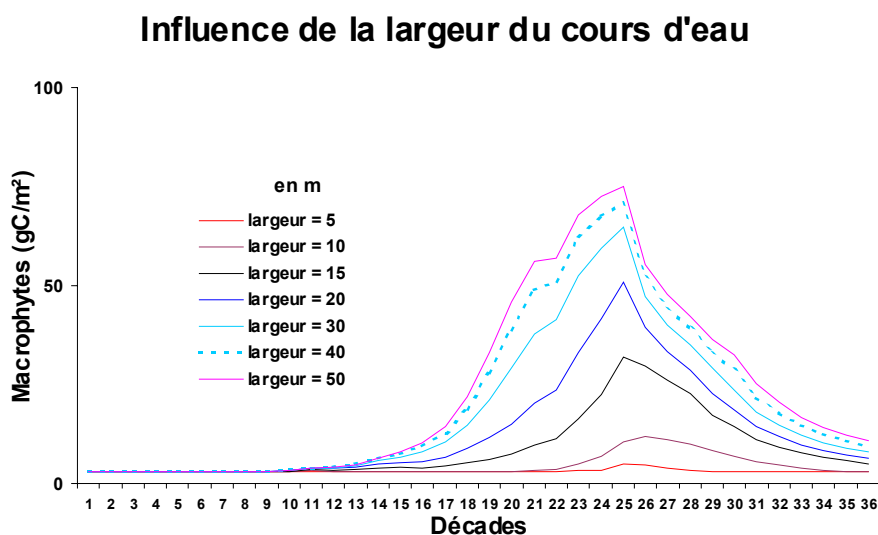


Figure 12 : Influence de la largeur du cours d'eau sur le développement macrophytique

On remarquera l'influence importante de la largeur du cours d'eau sur le développement de la biomasse macrophytique. En effet, pour une augmentation de largeur de 15 à 30 m par exemple, on assiste à un doublement de la couverture en plantes au moment du maximum annuel. Ces situations se rencontrent à proximité des ponts, où avec un doublement de la largeur du cours d'eau, il est facilement observable que la quantité de biomasse présente est plus bien importante que dans les secteurs plus étroits.

La simulation d'une variation de **pente** est moins spectaculaire (Figure 13). En restant dans des limites réalistes, on remarquera que cette contrainte exerce peu d'influence sur le développement des plantes aquatiques.

Influence de la pente du cours d'eau

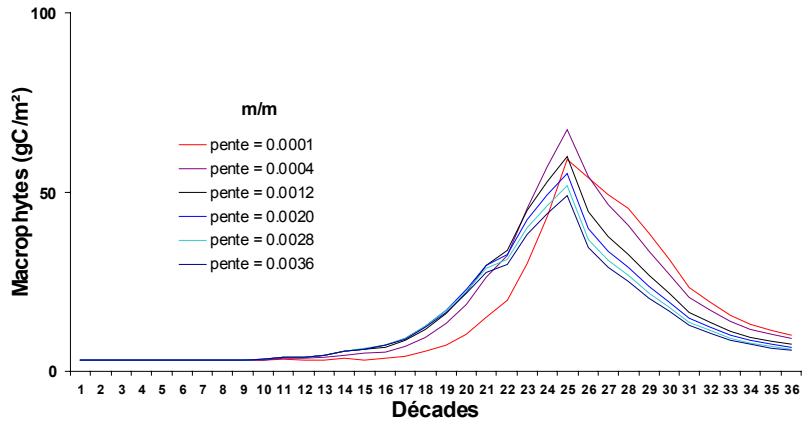


Figure 13 : Influence d'une variation de la pente sur le développement macrophytique

Au niveau de la croissance des plantes, une augmentation de la pente se traduit par une légère réduction du maximum de biomasse annuel simulé. Les cours d'eau d'ordre peu élevés, présentant des pentes plus fortes, se montreront un peu moins propices au développement des macrophytes.

4.2. Climat lumineux

La lumière représente évidemment un facteur de contrôle important. Ce contrôle s'exerce d'abord à travers *la variation inter-annuelle de la couverture nuageuse*. La comparaison de deux situations (ensoleillement de référence et réduit de 25 %), sur une station située dans un cours d'eau d'ordre 3 du bassin de la Blaise (données de base en 1995), met en évidence une différence de plus de 50% sur le maximum de biomasse atteint (Figure 14). Un décalage de plus d'un mois existe aussi entre les deux pics. Ces deux simulations mettent en évidence la nécessité de prendre en compte des variations annuelles d'ensoleillement. Ces résultats montrent aussi que le modèle général devrait prendre en compte des fichiers de lumière réelle.

Effet d'une réduction de la photopériode

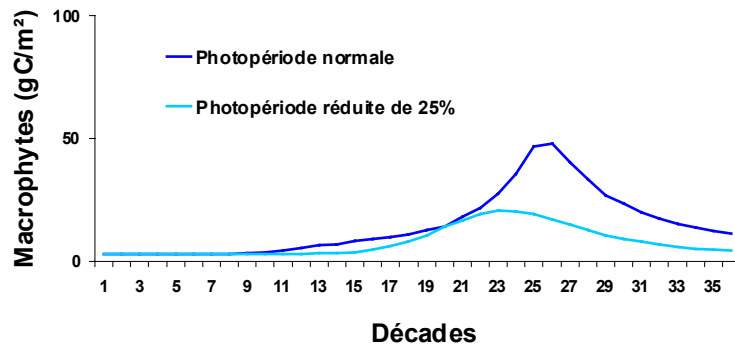


Figure 14 : Influence d'une variation inter-annuelle de la durée d'ensoleillement sur le développement macrophytique

L'ombrage du cours d'eau, engendré par la végétation des berges, constitue un autre facteur de régulation de la quantité lumière disponible pour la photosynthèse. Rappelons que l'ombrage peut être influencé par deux caractéristiques de la végétation rivulaire : la proportion de berge plantée et la hauteur des arbres. L'orientation du cours d'eau va également exercer une influence puisque l'ombrage

pourra être généré par la berge gauche, droite ou les deux. L'influence la plus évidente sera exercée par la proportion de berge plantée.

Le développement des plantes dont la densité de végétalisation des berges varie de 0 à 100% a été testé sur un cours d'eau d'une largeur de 7 m avec des arbres de 10 m de hauteur et disposés sur les deux berges (Figure 15).

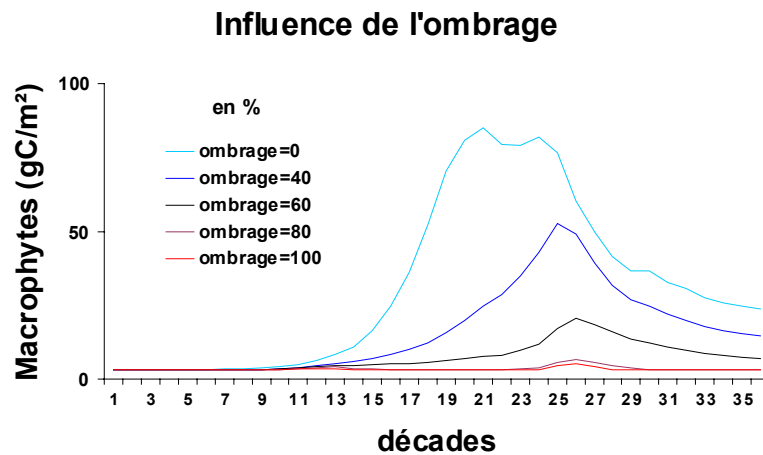


Figure 15 : Influence d'une variation du taux de végétalisation des berges sur le développement macrophytique.

L'importance de l'ombrage apparaît de manière capitale sur ce type de cours d'eau de faible largeur : la biomasse maximale annuelle en macrophytes passe de 85 gC m⁻² pour des berges complètement dégagées à 5 gC m⁻² en cas de végétalisation totale des abords de la rivière.

L'orientation a enfin été testée (Figure 16) en faisant varier l'orientation de 0° (le cours d'eau coule vers l'Est) à 180° (la rivière s'écoule vers l'Ouest). L'ensemble des autres directions d'écoulement peut être obtenu par symétrie.

La station simulée possède des berges gauche et droite plantées d'arbres de 10 m de hauteur. La largeur du cours d'eau est de 20 m. Cette situation est tout à fait plausible dans la Marne.

L'orientation du cours d'eau (en cas de présence de végétation sur les berges) exerce une influence non négligeable au niveau du potentiel de développement des macrophytes. Signalons le décalage temporel du pic de biomasse maximale calculé de juillet à septembre.

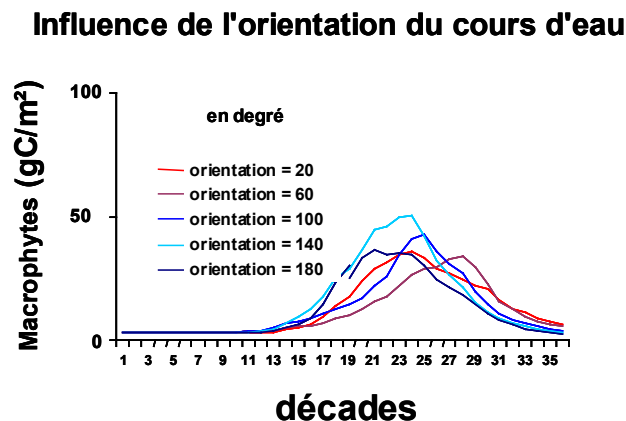


Figure 16 : Effet de l'orientation du cours d'eau sur la croissance des macrophytes

Afin de mieux mettre en évidence l'influence de l'orientation sur la quantité de lumière disponible, nous avons considéré les valeurs moyennes annuelles d'ombrage simulées pour les différentes orientations testées, toutes les autres caractéristiques du cours d'eau restant inchangées (Figure 17a). Il apparaît que, pour un secteur de cours d'eau d'une largeur de 20 m dont les berges sont complètement plantées d'arbres de 10m de hauteur, le taux d'ombrage moyen annuel varie entre 70 et 84%.

En terme de maximum de biomasse annuel simulé, la variation est encore plus marquée (Figure 17b). Dans le cas présenté au graphique précédent, une modification de l'orientation du cours d'eau peut réduire de 40% le pic de biomasse observé.

Les deux rivières étudiées, la Haute Marne et la Blaise, s'écoulent dans une direction générale Sud – Nord (270°) pour ensuite s'orienter selon un axe Est–Ouest (180°). Ces deux orientations correspondent chaque fois à un potentiel de développement intermédiaire.

La variation de l'orientation du cours d'eau est donc la base d'une régulation non négligeable du développement des macrophytes. La combinaison de ces différentes variations va être à l'origine d'un nombre de situations possibles quasi-infini que la modélisation permet de recréer de manière assez simple.

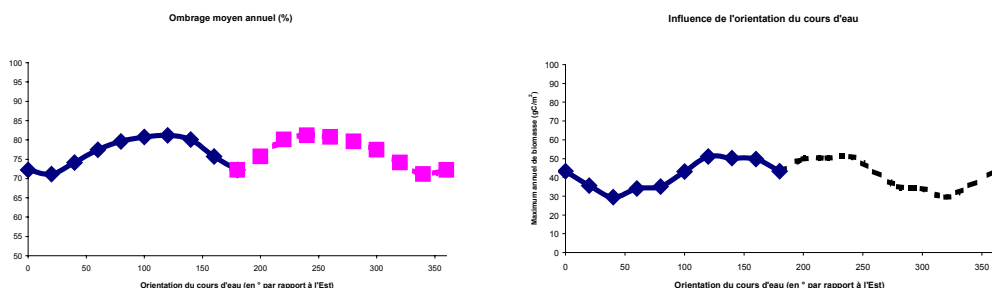


Figure 17 : a) Effet de l'orientation du cours d'eau sur l'ombrage moyen annuel. b) Effet de l'orientation du cours d'eau sur le maximum de biomasse simulé.

4.3. Les nutriments

La teneur en nutriments disponibles pour la croissance des plantes peut représenter facteur de contrôle important. Dans le bassin amont de la Marne, et dans celui de la Blaise, les concentrations relativement faibles en phosphates (de l'ordre de $20 \mu\text{gP l}^{-1}$) *a priori* non limitantes (cf un K_p égal à $5 \mu\text{gP l}^{-1}$), pourraient toutefois rapidement le devenir dans le cas d'une intensification de l'épuration tertiaire par exemple. La concentration en azote ne peut en aucun cas être à la base d'une régulation de la croissance.

Afin de quantifier les conséquences d'une augmentation ou d'une diminution des phosphates disponibles, nous avons réalisé une série de simulations en augmentant ou réduisant systématiquement la concentration rencontrée (Figure 18).

Influence de la concentration en phosphore

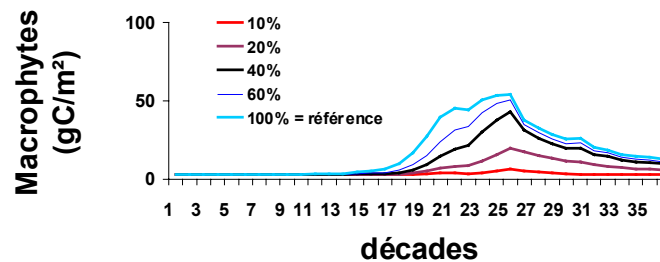


Figure 18 : Effet de l'influence des concentrations en phosphore sur la biomasse des macrophytes.

5. Localisation des zones à risque et stratégies de gestion

Le développement des macrophytes dans la Marne n'est important qu'à des endroits spécifiques, relativement peu nombreux et généralement associées à des modifications morphologiques assez nettes (abords des ponts, élargissements ponctuels, zones de faible profondeur...). Dans un but de surveillance de l'évolution de l'eutrophisation, il pourrait être utile de localiser ces "zones à risques", où l'envahissement par les plantes est le plus susceptible. Ces zones sont facilement et rapidement identifiables sur le terrain.

Les applications possibles du modèle sont multiples. Il est possible de tester les effets d'une intensification de l'effort d'épuration tertiaire domestique sur la biomasse macrophytique et d'établir les conséquences d'une réduction des apports diffus, de plus en plus incriminés vis-à-vis de l'eutrophisation des cours d'eau. Il est aussi possible de tester une augmentation de la charge en nutriments.

Le modèle RIVERSTRAHLER permet de calculer la qualité de l'eau pour chacun des ordres de rivières des sous-bassins. Les fichiers de qualité de l'eau ainsi que les caractéristiques particulières (pente, largeur...) des différents ordres de cours d'eau, contraintes du modèle RIVERSTRAHLER, sont utilisées comme données d'entrée par le modèle mono-station.

Une situation idéale ne présentant aucun ombrage a d'abord été envisagée (Figure 19), puis une situation plus réaliste avec 75% de végétalisation des berges a été testée (Figure 20).

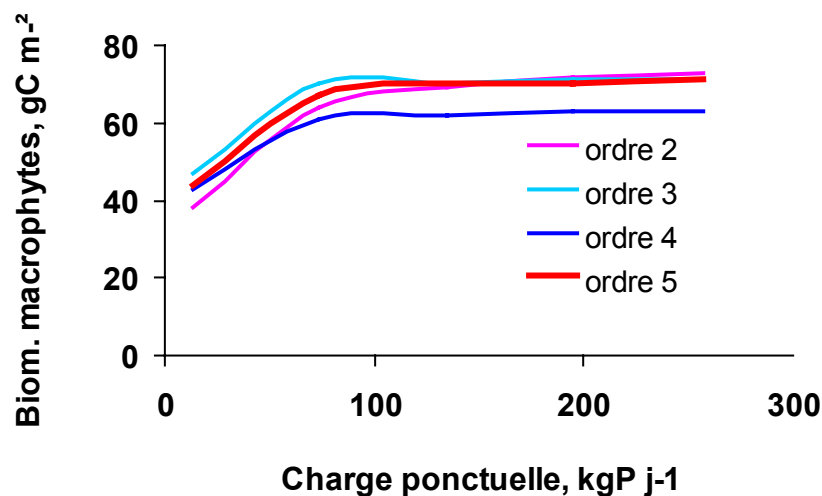


Figure 19 : Effet d'une variation de charge en phosphore sur le maximum de biomasse macrophytiques pour une situation sans ombrage.

La réduction des apports ponctuels en phosphore commence à influencer le développement des macrophytes à condition de réduire ceux-ci de 50% au moins. Cette valeur, bien que non négligeable, montre qu'un effort d'épuration réaliste pourrait mener à une réduction substantielle de la biomasse macrophytique présente dans la Marne. A titre de comparaison, une réduction de 90% sur la Semois ne présentait aucun effet significatif. Un contrôle plus efficace des apports diffus entraîne une réduction supplémentaire de la biomasse des macrophytes. Les biomasses simulées ici sont élevées en l'absence d'ombrage simulé.

Les simulations effectuées en considérant une végétalisation des berges de 75% mettent également en évidence une réduction du développement macrophytique en fonction de l'effort d'épuration tertiaire consenti (Figure 19). Des différences existent évidemment selon les ordres de cours d'eau considérés : aux petits ordres, très étroits, l'effet d'ombrage limite fortement la croissance des plantes, quelle que soit la charge en phosphore. L'ombrage et la suppression des rejets ponctuels conduirait à une très faible biomasse macrophytique.

Dans les deux situations étudiées ici, il est important de remarquer qu'une augmentation de la charge ponctuelle en phosphore n'entraîne pas d'augmentation de la production des macrophytes. Les exigences des macrophytes étant très faible vis-à-vis des phosphates, malgré les faibles valeurs de l'amont, les nutriments ne sont pas limitant.

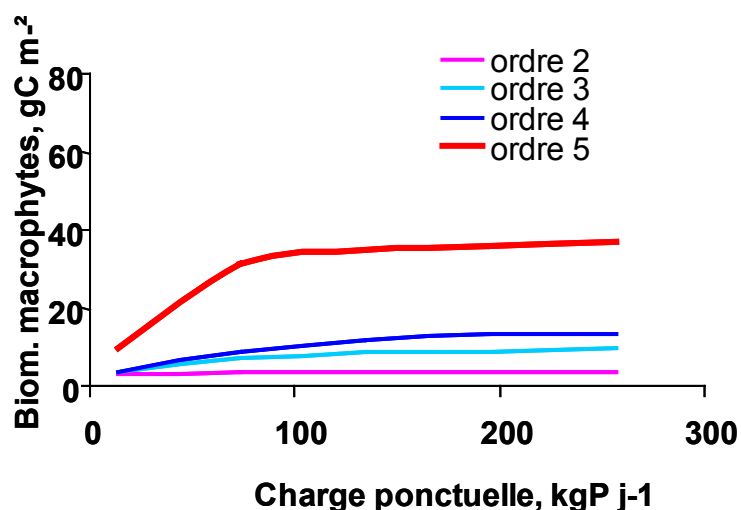


Figure 20 : Effet d'une variation de charge en phosphore sur le maximum de biomasse macrophytiques pour une situation avec 75 % d'ombrage.

Cette analyse met une nouvelle fois en évidence la complexité des mécanismes de contrôle du développement macrophytique : il existe en effet des interactions entre les régulations par la largeur du cours d'eau, la charge en nutriments et indirectement, l'ombrage.

6. Conclusions

Cette étude nous a permis d'intégrer un module de calcul du développement des macrophytes dans le modèle RIVERSTRAHLER appliqué à la Marne amont et la Blaise. Nous n'avons pas encore pu simuler les conditions réelles de 1999 et 2000 pour lesquelles nous avons des photographies analysées en terme de recouvrement, et de biomasse. Il serait également intéressant d'appréhender l'immobilisation des nutriments par les plantes.

A ce stade, le modèle nous a toutefois permis de calculer une évolution saisonnière plausible de la biomasse en une station sans limitation.

Il est important de rappeler que le développement de macrophytes est relativement faible à l'échelle des cours d'eau considérés. Les biomasses importantes sont localisées au niveau des ponts, quand se produit un élargissement de la rivière, et par conséquent une diminution de l'ombrage par les arbres des rives, et/ou une diminution de la profondeur... C'est en revanche dans les annexes des rivières que l'on trouve les macrophytes apparaissent comme une nuisance, mais l'approche RIVERSTRAHLER n'est évidemment pas adapté à ce type de problème.

L'utilisation du modèle mono-station permet d'ores et déjà de simuler de manière réaliste la réponse du développement des macrophytes à des facteurs de contrôle sur lesquels on peut agir: la lumière (ombrage) et les nutriments.

Afin de poursuivre cette étude, il est important de réfléchir au rôle des macrophytes dans un système. Dans des conditions de développement modéré, les macrophytes contribuent, au même titre que tous les autres organismes, à la biodiversité du milieu. Les macrophytes sont également connues pour représenter des micro-habitats tant pour les algues épiphytes, que pour les invertébrés ou encore une zone refuge pour les poissons (ponte, nourrissage des alevins ...). Outre leur rôle ornemental, les macrophytes peuvent également avoir un effet sur la vitesse du courant (rugosité), etc... Il serait certainement incohérent de chercher à les éliminer complètement du système.

7. Références bibliographiques

- Billen G., Garnier J. et Hanset Ph. (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: the RIVERSTRAHLER model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, 289:119-137.
- Billen G. & Garnier J. (1999). Nitrogen transfers through the Seine drainage network: a budget based on the application of the Riverstrahler model. *Hydrobiologia*, 410: 139-150.
- Dufayt, O. (2000). Etude expérimentale et modélisation du développement de la Renoncule flottante dans la Semois. Thèse. Fondation Universitaire Luxembourgeoise. Arlon (Belgique).
- Garnier J., Billen G. & Coste M. (1995). Seasonnal succession of diatoms and Chlorophyceae in the drainage network of the river Seine: Observations and modelling. *Limnol. Oceanogr.* 40: 750-765.
- Garnier J., Billen G. & Palfner L. (1999). Understanding the oxygen budget of the Mosel drainage network with the concept of heterotrophic/autotrophic sequences: the Riverstrahler approach. *Hydrobiologia*, 410: 151-166.
- Vander Borght P., Ska B., Schmitz A. & Wollast R. (1982). Eutrophisation de la rivière Semois. Le développement de Ranunculus et ses conséquences sur l'écosystème aquatique. Studies on Aquatic Vascular Plants, Roy. Bot. Soc. of Belgium. J.J. Symoens, SS Hooper & P. Compère, Ed. 340-345.
- Wright R.M. & Mc Donnell A.J. (1986). Macrophyte growth in shallow streams: biomass model. *J. Env. Eng.* 112 : 967-982.