

DYNAMIQUE DE MODIFICATION DE L'HABITAT PHYSIQUE DE REPRODUCTION DES PONDEURS LITHOPHILES SOUS GRAVIER. CAS DE DEUX FRAYÈRES À OMBRE DANS L' AISNE

Denis PARKINSON, François PETIT, Geoffrey HOUBRECHTS et Jean-Claude PHILIPPART

Résumé

D'octobre 1998 à mars 1999, nous avons étudié dans l'Aisne, petit affluent ardennais de l'Ourthe, la dynamique de modification de deux bancs de gravier utilisés comme frayère par l'ombre commun en mars-avril 1998. L'étude a été réalisée dans deux stations du cours inférieur de l'Aisne où se sont succédé quatre crues morphogènes. Dans chaque station, nous avons déterminé à intervalle d'environ 1 mois, la profondeur d'érosion et la hauteur de dépôt des sédiments (méthode de la barre d'érosion à chaînes), la granulométrie des matériaux des couches de surface et de subsurface, le dépôt des sédiments fins (placement de pièges à sédiments) et la perméabilité du substrat (méthode du standpipe). En complément, nous avons entrepris dans une station de l'Aisne moyenne, une caractérisation de divers éléments de la dynamique fluviale : identification des débits mobilisateurs (par marquage colorimétrique des sédiments en place), estimation de la vitesse de déplacement de la charge de fond (par étude de la dispersion longitudinale de scories, résidu d'anciennes industries métallurgiques) et estimation des quantités de sédiments charriés par la rivière (à partir des données de dragage).

Mots-clés

frayère, poissons lithophiles, sédimentologie du lit, rivière caillouteuse, bassin de la Meuse

Summary

From October 1998 to March 1999, in the Aisne river a small tributary of the Ourthe river; we studied the dynamics of modification of two gravel bars used as spawning grounds by the common grayling in March-April 1998. The study was conducted in two stations in the lower course of the Aisne river, where four successive morphogenic discharges occurred. In each station we determined, at one-month intervals, erosion depth and height of sediment deposits (with scour chains method), the granulometry of materials in surface and sub-surface levels, fine sediment deposits (placing of sediment traps) and substrate permeability (standpipe method). In parallel, at a station of the middle-region of the Aisne, we performed a characterisation of the various elements of the fluvial dynamic : identification of mobilising flows (through colorimetric marking of sediments in place), estimation of displacement speed of the bedload (by study of the longitudinal dispersion of scoria, residues of old metallurgy factories) and estimation of the quantities of sediments carried along by the river (from dredging data).

Key Words

spawning ground, lithophilous fishes, bed sedimentology, gravel bed river; Meuse basin

INTRODUCTION

La disponibilité et la qualité de l'habitat physique de reproduction constitue un facteur clé de la détermination de l'abondance des populations de poissons qui peuplent les cours d'eau des régions tempérées. Les modifications que peut subir cet habitat ont une influence potentielle importante sur le recrutement annuel des jeunes générations. En effet, c'est au moment de la reproduction et des stades de vie précoce qu'une espèce montre généralement les plus grandes exigences en terme d'habitat physique (Stalnaker et al., 1996).

La stratégie écologique d'enfouissement des oeufs qui se manifeste chez certains poissons pondeurs lithophiles

(Salmonidés tels que *Salmo spp.*, *Thymallus sp.*, *Barbus barbus*) lie leur succès reproducteur à la présence d'un substrat caillouteux ou graveleux constituant un milieu favorable à l'expression des comportements reproducteurs et au développement des embryons (D'Hulstère et Philippart, 1982; Crisp, 1996; Mann, 1996).

Les dépôts de sédiments plus ou moins grossiers qui constituent le fond d'un cours d'eau à écoulement rapide sont sujets à d'importantes et fréquentes modifications en relation avec les fluctuations du débit et avec les changements, naturels ou provoqués par l'activité humaine, qui interviennent au niveau du lit et du bassin versant. Dès lors, l'étude des facteurs qui conditionnent

le succès reproducteur des poissons pondeurs sous gravier doit impérativement prendre en compte les phénomènes liés à la dynamique de transport et de dépôt des sédiments fluviaux (Parkinson et al., 1999).

De nombreuses études se sont attachées à définir les exigences des poissons pondeurs lithophiles sous gravier vis-à-vis de leur habitat de reproduction et, en particulier, à comprendre comment les phénomènes de transport sédimentaire influencent leur succès reproducteur (Alexander et Hansen, 1986; Carling, 1987; Lisle, 1989; Scrivener et Brownlee, 1989; Kondolf et al., 1991; Lisle et Lewis, 1992; Montgomery et al., 1996; Payne et Lapointe, 1997; Massa et al., 1998; Lapointe et al., 20(X)). Ces interactions sont à présent bien connues d'un point de vue qualitatif (voir synthèse in Parkinson et al., 1999a) mais il faut se montrer prudent quand il s'agit de transposer à un cours d'eau non étudié, des connaissances acquises dans d'autres bassins versants, ceci en fonction de la variabilité qui caractérise la dynamique du lit des cours d'eau à fond caillouteux (Lisle, 1989) : régime d'écoulement, nature et ampleur de l'apport sédimentaire en provenance des affluents, du bassin versant et de l'érosion des berges. Toutefois, dans un contexte régional déterminé, comme par exemple les rivières ardennaises (voire, de façon plus générale, des rivières de « basse montagne », à charge caillouteuse, à régime pluvial océanique, développées sur terrains schisto-gréseux), il est clair que des tendances générales peuvent se dégager.

Cette étude préliminaire réalisée fin 1998 — début 1999 avait pour objectif d'étudier dans l'Aisne, petite rivière salmonicole du bassin de la Meuse, la dynamique de modification des bancs de gravier utilisés comme frayères par la population résidente et migratrice d'ombre commun (*Thymallus thymallus*, famille des *Thymallidae*). Nous présentons des données concernant les débits responsables de la mobilisation des bancs de gravier-frayères, la taille des éléments mobilisés et l'impact de ces remaniements sur la structure granulométrique des bancs (profondeur d'érosion, élimination et dépôt des sédiments fins, évolution de la perméabilité). Nous ferons également référence à une autre étude menée sur l'Aisne où la mobilisation et le déplacement de la charge de fond ont été appréhendés par d'autres approches (Houbrechts, 2000).

1. CARACTÉRISTIQUES ET CHOIX DU SITE D'ÉTUDE

L'Aisne est une rivière pentue à fond caillouteux de l'Ardenne belge qui appartient au bassin de la Meuse (Fig. 1). Elle prend sa source sur le plateau des Tailles (à une altitude proche de 6(X) m) et conflue avec l'Ourthe à Bomal (à 131 m d'altitude), après un cours de 35 km. Son bassin versant dont la superficie est légèrement inférieure à 190 km² est en grande partie boisé. La rivière coule principalement sur des terrains schisteux et gréseux du Cambro-ordovicien et du Dévonien inférieur;

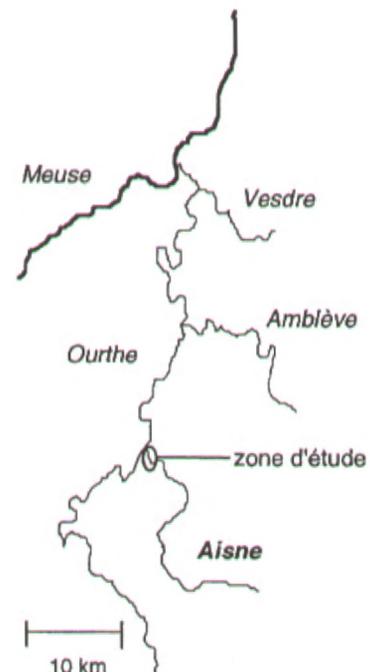
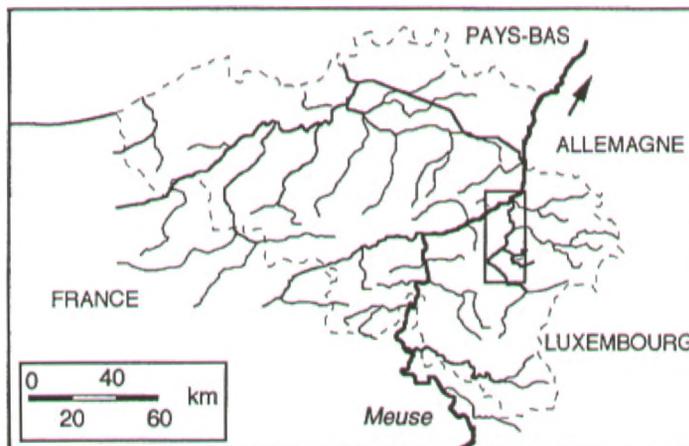


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude.

ce n'est que dans la partie aval de son cours qu'elle atteint les calcaires du Dévonien moyen. Sa pente longitudinale, de la source à la confluence, est de $0,013 \text{ m.m}^{-1}$; dans son cours inférieur, la pente longitudinale se réduit à $0,0056 \text{ m.m}^{-1}$ et la largeur moyenne du lit mineur y atteint **13 à 14 m**.

Le peuplement en poissons de l'Aisne comprend essentiellement deux espèces de Salmonidés : la truite commune (*Salmo trutta furia*) et l'ombre commun (*Thymallus thymallus*) et des espèces d'accompagnement comme le vairon (*Phoxinus phoxinus*), le chabot (*Cottus gobio*), la loche franche (*Barbatula barbatula*) et l'anguille (*Anguilla anguilla*). Des cyprinidés rhéophiles (barbeau fluviatile *Barbus barbus* L.; hotu *Chondrostoma nasus* L.; chevaine *Leuciscus cephalus* L.; vandoise *Leuciscus* L. et ablette spirin *Alburnoides bipunctatus*) ne sont présents que dans une partie très limitée du cours inférieur (de la confluence à un barrage situé 600 m en amont).

L'étude relatée dans cet article a été réalisée sur deux bancs de gravier-frayères à ombre situés dans le cours inférieur de l'Aisne : un banc de convexité associé à un seuil transversal (site « Blaude » en amont de Juzaine à 3 975 m de la confluence avec l'Ourthe (Photo 1) et un banc associé à un pont routier, situé sur un tronçon rectiligne (site « carrière » au village d'Aisne à 5 725 m en amont de la confluence (Photo 2). Le premier dépôt est situé dans un secteur n'ayant subi aucune intervention humaine lourde depuis 10 ans (travaux d'aménagement des berges et curage) tandis que le second a été profondément modifié par la construction récente (1997) du pont. Ces deux sites ont été choisis parce qu'ils avaient été identifiés comme frayères effectives à ombre pendant la reproduction d'avril 1998, grâce à la localisation de géniteurs mâles radio-pistés et l'observation directe d'épisodes de frai (Parkinson et al., 1999). Il faut signaler par ailleurs que le site de frayère « Blaude » a été utilisé pour procéder le 4 avril 1999 à une implantation expérimentale d'oeufs d'ombre afin de tester la survie sous gravier jusqu'à l'émergence le 4 mai (Parkinson et Philippart, 2001).

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. Données de débit

Une station limnigraphique est installée à Juzaine juste avant la confluence avec l'Ourthe; les débits y sont enregistrés depuis 1976 par la Région wallonne (SCENN) avec toutefois une interruption entre 1988 et 1992. Les crues maximales annuelles (exprimées en débit moyen journalier) ont été ajustées dans la distribution de Gu mbel afin de déterminer certains débits caractéristiques. Nous avons également travaillé avec la série partielle des débits dans ce même type d'ajustement, en retenant comme valeur seuil la crue maximale annuelle la plus faible de

la série ($12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),

L'observation systématique de nombreuses crues à des niveaux proches du débordement a permis de nuancer la valeur du débit à plein bord présentée précédemment par Petit et Daxhelet (1989) et qui, comme le notaient d'ailleurs ces auteurs, s'écartait assez sensiblement de la régression effectuée pour une vingtaine de rivières à charge caillouteuse développées sur substrat imperméable, regroupant essentiellement des rivières ardennaises. Au terme de cette analyse, Houbrechts (2000) propose un débit de 24 (exprimé en débit de pointe), entre 20 et 22 (exprimé en débit journalier); la récurrence de cette fourchette de débit est de 1,62-1,81 an et de 0,84-0,99 an selon que l'on utilise respectivement la série annuelle ou la série partielle des débits. De telles récurrences correspondent bien aux valeurs mises en évidence dans des rivières ardennaises (Petit et Pauquet, 1997),

B. Suivi des bancs — frayères

La profondeur d'érosion et de dépôt des bancs de gravier lors des débits mobilisateurs a été mesurée par la mise en place de barres d'érosion à chaînes (Laronne et Carson, 1976; Duncan et Ward, 1985 (Fig. 2). Ces barres ont été régulièrement espacées le long de transects, couvrant l'entière de la zone utilisée par les poissons (3 transects de 3 barres dans le site « Blaude » et 3 transects de 4 barres dans le site « carrière »). La lecture et la remise à zéro des barres ont été réalisées avec une périodicité d'un mois, sous réserve que le débit rendait le site accessible. Des mesures de profondeur le long des transects, lors de la pose initiale des barres, a permis l'établissement du profil initial du lit.

La quantité de sédiments fins déposés a été évaluée grâce à la pose de pièges à sédiments (Carling, 1984). Ces pièges sont constitués par des réceptacles cylindriques ($0 = 110 \text{ mm}$, $h = 120 \text{ mm}$), ouverts sur le dessus et grillagés latéralement (treillis métallique plastifié de 8 mm de maille carrée). Chaque piège (3 dans le site aval et 4 dans le site amont) a été enterré dans le substrat avec son bord supérieur affleurant à la surface du lit. Le gravier extrait lors de l'enfouissement du piège a été récupéré, tamisé pour éliminer tous les éléments de diamètre inférieur à 8 mm et reversé dans le piège. Les pièges ont été relevés à des intervalles d'un mois et, chaque fois, le gravier qu'ils contenaient a de nouveau été tamisé pour extraire les sédiments fins déposés. Les pièges ont été remis en place après chaque contrôle. Au laboratoire, les sédiments fins ont ensuite été pesés après avoir été séchés à 180° C . La quantité de sédiments fins déposés dans un piège pendant 1 mois a été exprimée en terme de poids par unité de surface ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$).

Trois prélèvements de sédiments (2/12/98, 5/1 et 10/3/99) ont été réalisés manuellement sur chaque site dans



Photo 1 : L'Aisne site « Blaude » en avril 1999. Radier oblique en amont duquel l'étude a été réalisée en fin 1998-début 1999.

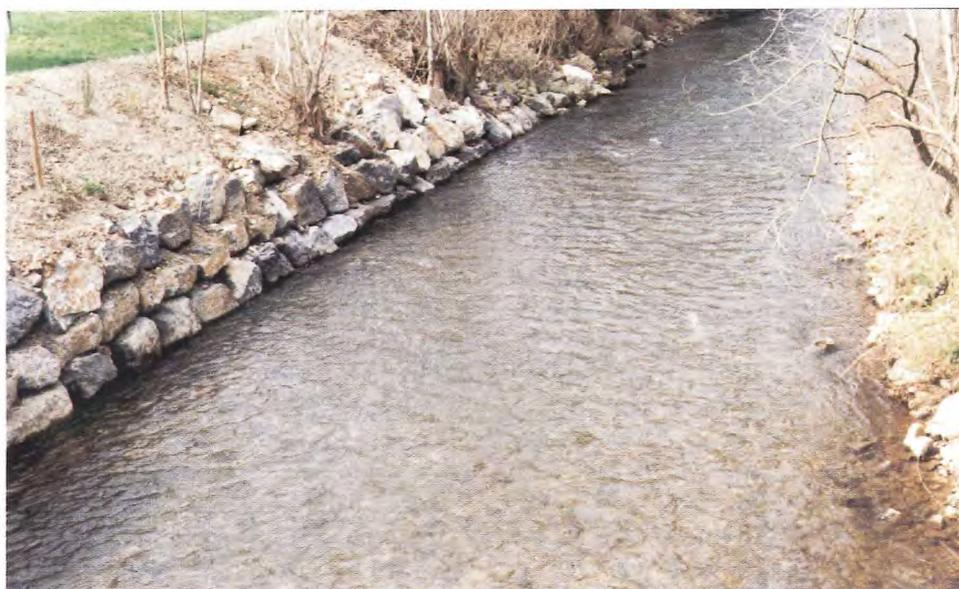


Photo 2 : L'Aisne site « carrière » au printemps 1998 après des travaux de réfection d'un pont. Radier transversal uniforme où l'étude a été réalisée en fin 1998-début 1999.

une même zone de 2 x 2 m. La couche de surface (épaisseur équivalente au diamètre du plus gros élément) et la couche sous-jacente ont été prélevées séparément. La quantité de matériel prélevé a été adaptée en fonction du diamètre des particules de l'échantillon. Lors des prélèvements, les éléments fins mis en suspension ont été récupérés dans un filet (maille : 0,4 mm) placé directement à l'aval. Les courbes granulométriques ont été établies après mesures individuelles et pesées globales des éléments de diamètre supérieur à 26,5 mm et tamisages successifs des éléments moins grossiers. Les limites de classe de taille utilisées sont échelonnées régulièrement de 0,42 mm à 106 mm, selon une progression géométrique

égale à $\sqrt{2}$. La fraction fine inférieure à 420 μm a été négligée dans les calculs en raison du biais d'échantillonnage (filet). Deux indices granulométriques ont été utilisés : la taille moyenne (M_d) des particules et le *fredle index* (F_i), qui exprime un rapport entre la taille moyenne et le degré de classement des particules du substrat (Lotspeich et Everest, 1981). Ce dernier indice est largement utilisé dans la littérature pour quantifier la structure granulométrique des frayères à Salmonidés (Chapman, 1988; Young et al., 1991). Lors de la représentation graphique de la distribution granulométrique des sédiments étudiés et du calcul de leur taille moyenne, nous avons utilisé une transformation logarithmique de

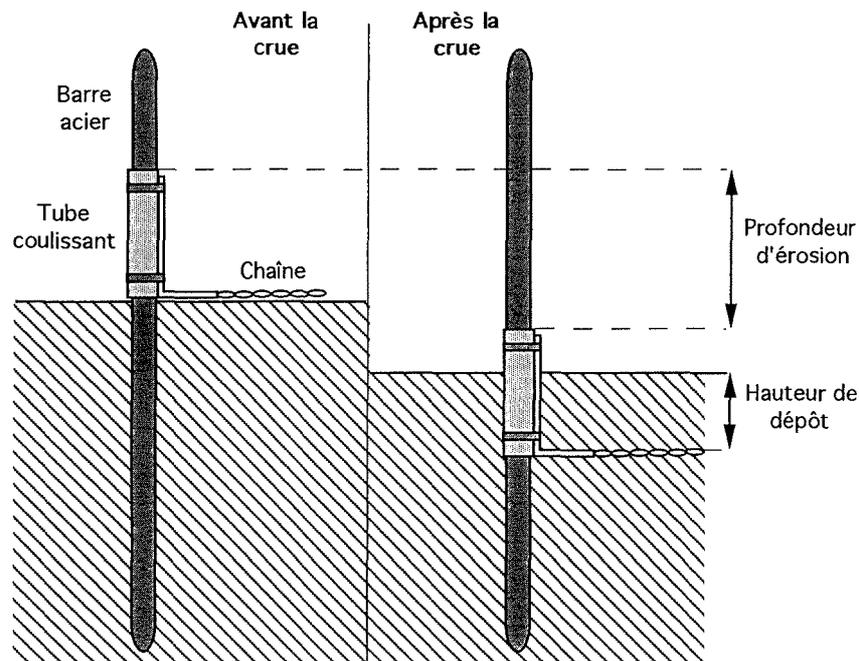


Figure 2. Représentation schématique du principe de fonctionnement de la barre d'érosion.

la taille des particules (échelle ϕ ; $\phi = -\log_2 D$, avec D le diamètre des particules considérées exprimé en mm).

$$M_y = (\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}) / 3$$

$$F_i = D_g / S_0 \text{ avec } D_g = (D_{16} * D_{84})^{1/2} \text{ et } S_0 = (D_{75} / D_{25})^{1/2}$$

D_x (ou ϕ_x) est le diamètre limite des particules qui représentent x % du poids total de l'échantillon de sédiment (en allant des particules de petite taille vers celles de grande taille pour l'échelle métrique et le contraire pour l'échelle ϕ , p. ex. $D_{84} = \phi_{16}$). Ces valeurs de D_x et ϕ_x ont été obtenues par interpolation de la courbe représentant les fréquences (%) cumulées du poids des particules dans l'échantillon en fonction du logarithme de leur diamètre.

Des observations préliminaires sur la perméabilité du substrat ont été obtenues grâce à la méthode du *standpipe* (Terhune, 1958). Les mesures ont été prises 10 cm sous la surface du lit et les valeurs de perméabilité (cm.h^{-1}), mesurées sous différentes conditions de température de l'eau, ont été ramenées à des valeurs standard à 10° C. Dans chaque site et lors de chaque contrôle (6/10/98, 2/12/98, 5/1/99, 25/1/99 et 10/3/99), la perméabilité a été mesurée en deux points, toujours les mêmes, le premier situé dans la zone amont du banc de gravier étudié et le second dans la zone aval. Les données présentées sont les moyennes de ces deux mesures et visent essentiellement à caractériser l'évolution temporelle du phénomène sans vouloir donner une représentation spatiale précise.

C. Mobilisation de la charge de fond et estimation des quantités charriées

Cette analyse porte sur trois points qui font appel à une méthodologie différente de celle exposée au paragraphe précédent, mais qui s'inscrivent en complément quant à la mobilisation de la charge de fond : il s'agit de l'identification des débits mobilisateurs de la charge de fond, de la vitesse de propagation de la charge de fond dite encore « vague sédimentaire » et de l'estimation des quantités de matériau charrié par la rivière.

Une campagne de marquages colorimétriques a été réalisée au début du mois d'octobre 1999 dans la partie supérieure du cours de l'Aisne (entre « Pont d'Érezée » et « La Forge »). Nous avons sélectionné quatre seuils et peint *in situ* une placette d'1 m² de superficie; afin de connaître la granulométrie du matériau marqué sans le déranger, nous avons appliqué la « technique de la grille » mise au point par Kellerhals et Bray (1971).

Le transit de la charge de fond a été abordé de façon indirecte en utilisant comme traceur les scories rejetées dans l'Aisne dès le Moyen Âge, lorsque les premiers hauts-fourneaux se sont installés dans les vallées ardennaises (Houbrechts, 2000). Cette technique présente l'avantage de prendre en compte les facteurs influençant la progression des éléments sur de longues périodes (piégeage dans les bancs de convexité, dans les che-

naux abandonnés...). En outre, il est possible de se faire une opinion quant au tri hydraulique et quant à la compétence effective de la rivière (c'est-à-dire la taille maximale des éléments qui peuvent être évacués du bassin versant).

Les quantités charriées par la rivière ont été estimées sur base du relevé des quantités de sédiments régulièrement retirés du lit par les gestionnaires du cours d'eau. Il faut en effet rappeler que ces dragages sont systématiquement effectués aux mêmes endroits et que ces sites jouent finalement un rôle analogue à celui d'un piège à sédiments, de telle sorte que les quantités draguées à différentes époques successives donnent bien une estimation du débit solide de la charge de fond. Par ailleurs, la fréquence de ces dragages donne en quelque sorte une idée de la vitesse de reconstitution des formes du lit.

III. RÉSULTATS

A. Débit

La figure 3 donne l'évolution du débit de l'Aisne à Juzaine : quatre épisodes de crue caractérisent la durée de l'expérience. Les différentes mesures (érosion-dépôt, perméabilité du substrat, dépôt de sédiments fins et granulométrie des matériaux du lit) ont été réalisées entre ces périodes de débit élevé et permettent donc d'évaluer l'impact des crues sur les facteurs suivis :

(i) contrôle du 2/12/98 : effet de la crue du 1/11/98;

(ii) contrôle du 5/1/99 : effet de la crue du 13/12/98;
(iii) contrôle du 25/1/99 : absence de crue (débit max. = $5,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);
(iv) contrôle du 10/3/99 : effet des crues du 20/2 et du 2/3/99.

Les débits atteints lors de ces différentes crues (exprimés en débit de pointe et en débit journalier) ainsi que les récurrences calculées sur les débits journaliers, à partir des séries annuelle et partielle, sont repris au tableau 1.

B. Érosion et dépôt sur les bancs – frayères

Les crues du 20/2/99 et du 2/3/99 ont emporté ou plié l'entièreté des barres sur les deux sites, de telle sorte que les données d'érosion et de dépôt au 10/03/99 ne sont pas disponibles. Nous pouvons cependant supposer que le remaniement du lit lors de ces deux crues a été le plus important depuis le début de l'expérience.

Sur les trois périodes considérées, les profondeurs moyennes d'érosion et de dépôt (Tableau 2; Fig. 4a et 4b) ont été comparables entre elles dans le site « Blaude » (test de Student : $p = 0,105$) comme dans le site « carrière » ($p = 0,097$). Par contre, les profondeurs moyennes d'érosion ont été significativement supérieures dans le site « carrière » par rapport au site « Blaude » (test de Student : $p = 0,044$). Le banc-frayère « pont » présente donc globalement une moins grande stabilité à l'érosion que le banc-frayère « Blaude ». Les profondeurs moyennes de dépôt ont suivi la même tendance, mais à un ni-

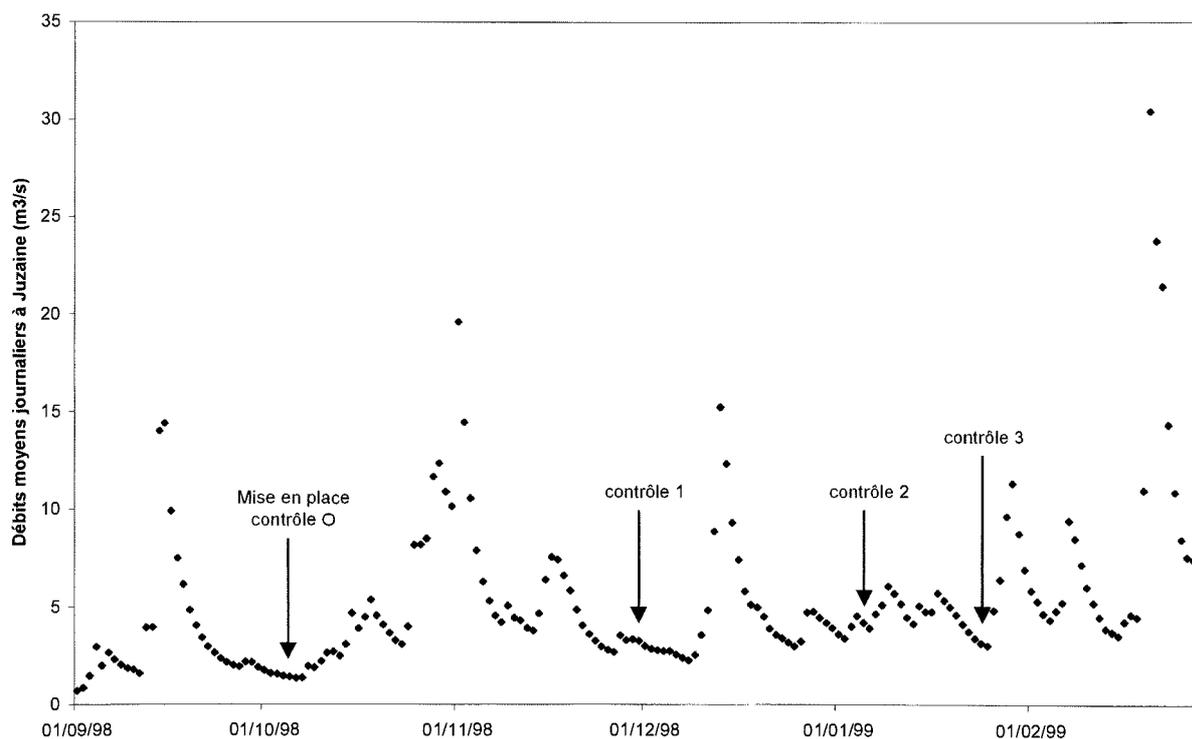


Figure 3. Débit de l'Aisne à Juzaine entre septembre 1998 et mars 1999. Le débit maximal atteint lors des crues ainsi que la chronologie des différents contrôles expérimentaux sont indiqués, à l'exception du dernier contrôle (10/3/99).

veau non significatif ($p = 0,368$). Les profondeurs moyennes d'érosion et de dépôt au 26/11/98 ont été nettement supérieures dans les deux sites groupés à celles observées au 5/1/99 (test de Student : $p = 0,005$ et $p = 0,003$, respectivement) et au 25/1/99 ($p < 0,001$ dans les deux cas). Une mobilisation importante des bancs étudiés s'est donc produite pour un débit seuil compris entre $15,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (crue du 13/12/98) et $19,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (crue du 1/11/98). Comme Petit et al. (1996) l'ont observé dans d'autres rivières ardennaises, le charriage débute bien pour un débit inférieur au débit à plein bord. Lors de ces deux crues, les puissances spécifiques ont atteint respectivement 63 et $83 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, valeurs qui, lorsque l'on se réfère aux puissances spécifiques critiques (Petit et al., 2000), justifient bien la mobilisation des éléments qui constituent le lit ($D_{50} = 70$ à 76 mm).

Les profondeurs moyennes d'érosion et de dépôt fai-

sant suite à une crue donnée ont montré une variabilité spatiale importante dans les deux sites. Cette variabilité traduit un impact des crues sur l'évolution du profil transversal des bancs de gravier-frayères. Dans le site « Blaude », la tendance observée va dans le sens d'une augmentation de la hauteur du banc de convexité (bilan en faveur du dépôt; Fig. 5). Dans le site « carrière », un creusement des deux coulées profondes entourant le banc de gravier central a pu être observé, en même temps qu'un rehaussement du banc (Fig. 6). La tendance globale a donc consisté en une accentuation de la forme du dépôt.

C. Structure granulométrique

Pour rappel, les prélèvements granulométriques ont été réalisés les 2/12/98, 5/1/99 et 10/3/99. Ces données permettent dès lors de comparer les modifications du lit

Tableau 1. Débit de pointe, débit moyen journalier et récurrence des différentes crues enregistrées au cours de la période d'observation

	Débit de pointe en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Débit moyen journalier en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Récurrence (en année) série annuelle	Récurrence (en année) série partielle
01/11/98	23,7	19,7	1,59	0,63
13/12/98	16,7	15,3	1,29	0,60
20/02/99	38,1	30,5	3,26	2,24
02/03/99	30,2	27,2	2,55	1,60

Tableau 2. Profondeur d'érosion et hauteur de dépôt (cm) mesurées avec les barres d'érosion sur les deux frayères suivies aux différentes dates dans l'Aisne; moyenne \pm écart-type (*min-max*)

	« Blaude »		« Carrière »	
	Érosion	Dépôt	Érosion	Dépôt
26/11/98	$2,56 \pm 3,09$ (0-14)	$2,89 \pm 2,26$ (0-7)	$6,09 \pm 4,32$ (0-14)	$7,36 \pm 4,92$ (0-14)
05/01/99	$0,22 \pm 0,67$ (0-2)	$1,44 \pm 3,28$ (0-10)	$1,54 \pm 1,57$ (0-4)	$0,821 \pm 1,54$ (0-5)
25/01/99	$0,44 \pm 1,01$ (0-3)	$1,22 \pm 2,11$ (0-6)	$0,45 \pm 0,04$ (0-3)	0
Total	$1,07 \pm 2,13$ (0-10)	$1,85 \pm 2,61$ (0-10)	$2,70 \pm 3,62$ (0-14)	$2,73 \pm 4,42$ (0-14)

provoquées par la crue du 13/12/98, d'une part, et par les crues du 28/1/99 ($9,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 20/2/99 ($30,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et 2/3/99 ($27,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) groupées, d'autre part.

D'une manière générale, le banc de gravier-frayères « carrière » est constitué de particules plus grossières que le banc « Blaude », dans la couche de surface comme dans la couche sous-jacente (Tableau 3). Les modifications consécutives aux crues ont été sensiblement différentes pour la couche de surface et la couche sous-jacente. Dans la couche de surface, la taille moyenne des particules n'a subi qu'une légère diminution du 2/12/98 au 5/1/99 (75,63 à 71,95 mm dans le site « carrière » et de 46,04 à 34,15 mm dans le site « Blaude »). En revanche, une diminution beaucoup plus importante est observée dans la couche sous-jacente (de 45,45 à

17,49 mm dans le site « carrière » et de 13,92 à 7,64 mm dans le site « Blaude »). En accord avec l'érosion faible observée pendant cette période, la diminution de la taille moyenne des particules du banc a probablement été causée par un colmatage des bancs par des particules de petite taille (fins graviers et sables) plutôt que par un remaniement global du dépôt avec remplacement des particules par d'autres, moins grossières. La diminution plus importante du diamètre moyen des particules dans la couche sous-jacente s'expliquerait par l'accumulation préférentielle des fines en profondeur plutôt qu'en surface, où la vitesse du courant ne permet pas leur sédimentation.

Du 5/1 au 10/3/99, on observe dans les deux sites une augmentation importante de la taille moyenne des parti-

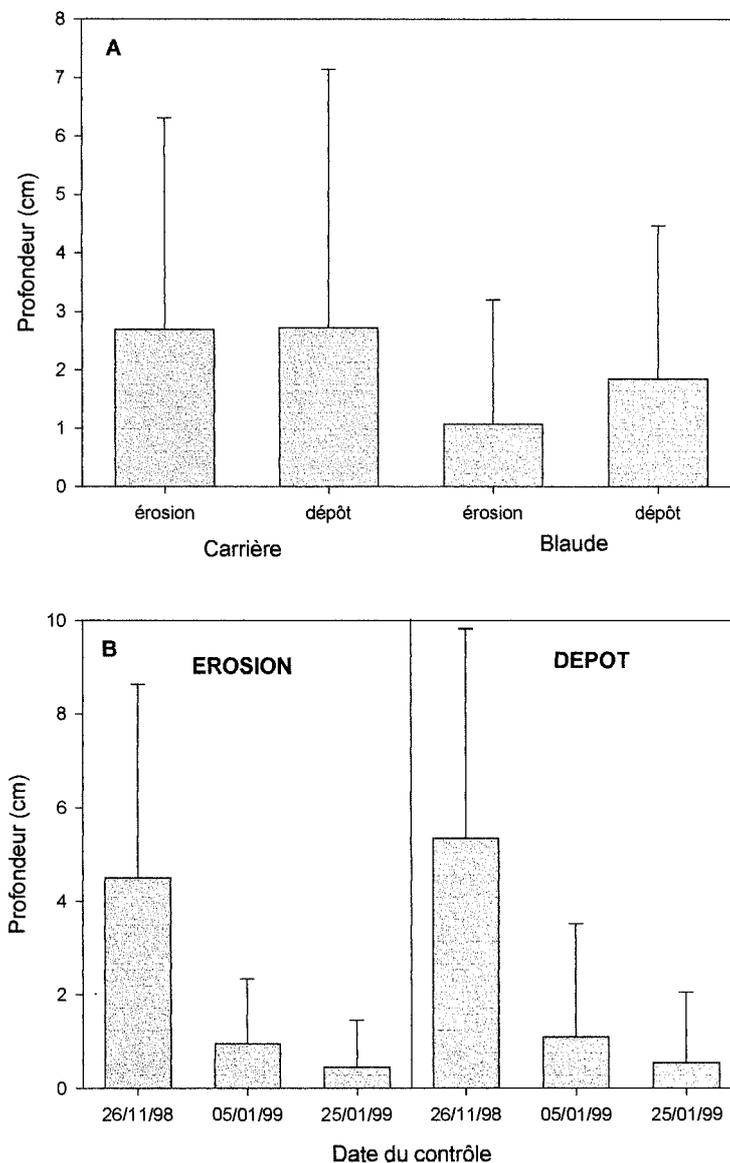


Figure 4A et 4B. Valeurs moyennes des profondeurs d'érosion et des hauteurs de dépôt dans les deux sites expérimentaux de l'Aisne (« Blaude » et « carrière »). A : comparaison des deux sites, toutes dates confondues; B : profondeurs moyennes d'érosion et hauteurs moyennes de dépôt aux différentes dates, les deux sites confondus.

cules, à la fois dans les couches de surface et sous-jacentes (Tableau 3). Les crues plus importantes du 21/2 et 3/3/99 ont donc entraîné un remaniement global et profond des bancs étudiés (cailloux plus grossiers et diminution du colmatage).

D. Dépôt de sédiments fins

Plus de la moitié des pièges à sédiments disposés ont été emportés ou enfouis lors des différentes crues. Dès lors, seules des valeurs moyennes et extrêmes de dépôt peuvent être calculées, indépendamment du site d'implantation du piège ou de sa période d'exposition. Les

valeurs de dépôt des particules de petite taille ont varié entre 8,73 et 44,12 kg.m⁻², pour une moyenne de 27,84 ± 11,96 kg.m⁻².

E. Évolution de la perméabilité du substrat

Globalement, les perméabilités mesurées sur le site « carrière » (3 809 ± 2 666 cm.h⁻¹; n =10) ont été significativement (test de Student; p = 0,019) plus importantes que sur le site « Blaude » (1 264 ± 925 cm.h⁻¹; n =10), en accord avec la taille plus grossière des particules constituant le dépôt « carrière ».

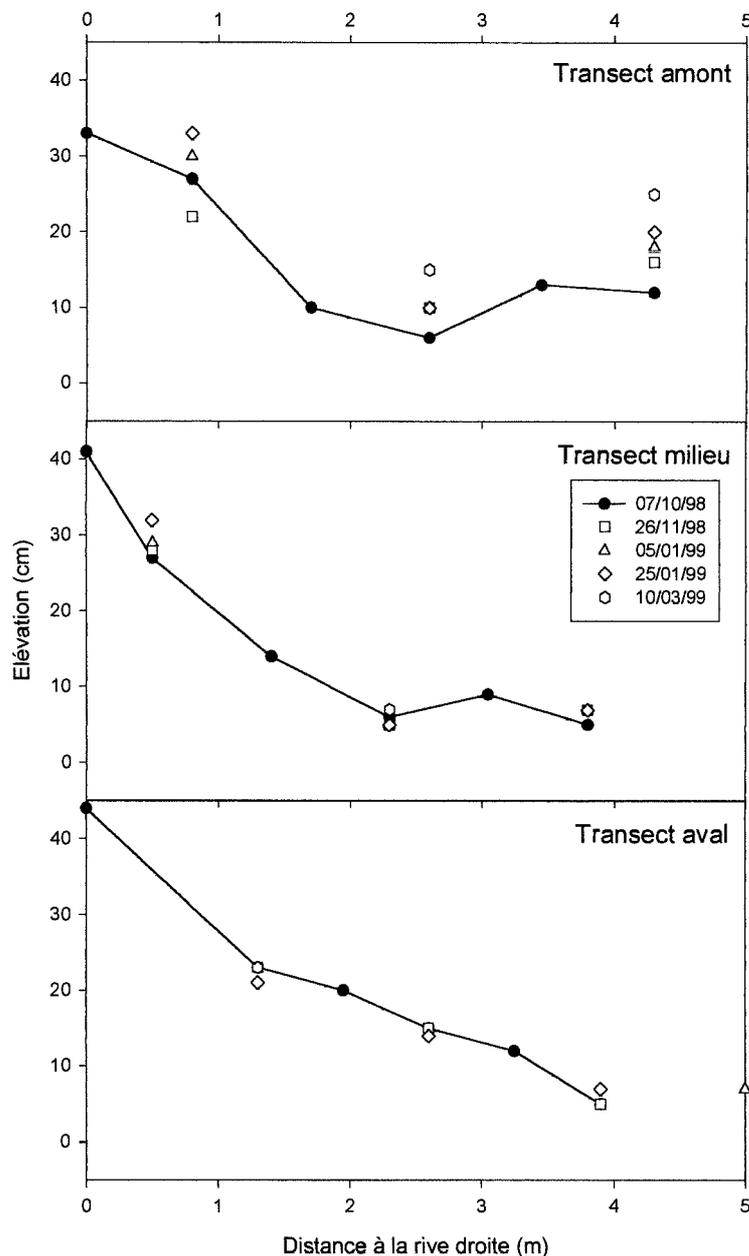


Figure 5. Évolution du banc de gravier-frayères du site « Blaude » en réponse aux différentes crues de l'Aisne survenues pendant la période allant du 7/10/98 au 10/3/99. Observations réalisées au niveau de trois profils transversaux distants de 5 m l'un de l'autre.

L'effet de la crue du 1/11/98 s'est avéré très différent dans les deux sites (Fig. 7) : l'augmentation importante de la perméabilité du banc « carrière » (de 3 640 cm.h^{-1} le 7/10 à 7377 cm.h^{-1} le 2/12/98) n'a pas été observée dans le banc « Blaude » (de 1 196 à 1 058 cm.h^{-1} aux mêmes dates). En revanche, les crues de fin février-début mars 1999 ont provoqué une augmentation de la perméabilité dans les deux sites (« Blaude » : de 694 à 2 544 cm.h^{-1} du 25/1 au 10/3/99; « carrière » : de 1 998 à 4 505 cm.h^{-1}). Ces résultats confirment les observations réalisées sur la granulométrie des bancs de gravier et sur les amplitudes d'érosion et de dépôt, en réponse aux crues.

Du 2/12/98 au 5/1/99, une diminution importante de la perméabilité a été observée dans le site « carrière » (de 7 377 à 1 527 cm.h^{-1}) et, dans une moindre mesure, dans le site « Blaude » (de 1 058 à 828 cm.h^{-1}). Cette variation est parallèle au colmatage des deux bancs de gravier-frayères pendant cette période.

F. Formation d'un banc caillouteux suite à une crue morphogène

Suite aux crues du 21/2 et du 3/3/99 (toutes deux de l'ordre de $30 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), un banc caillouteux s'est formé

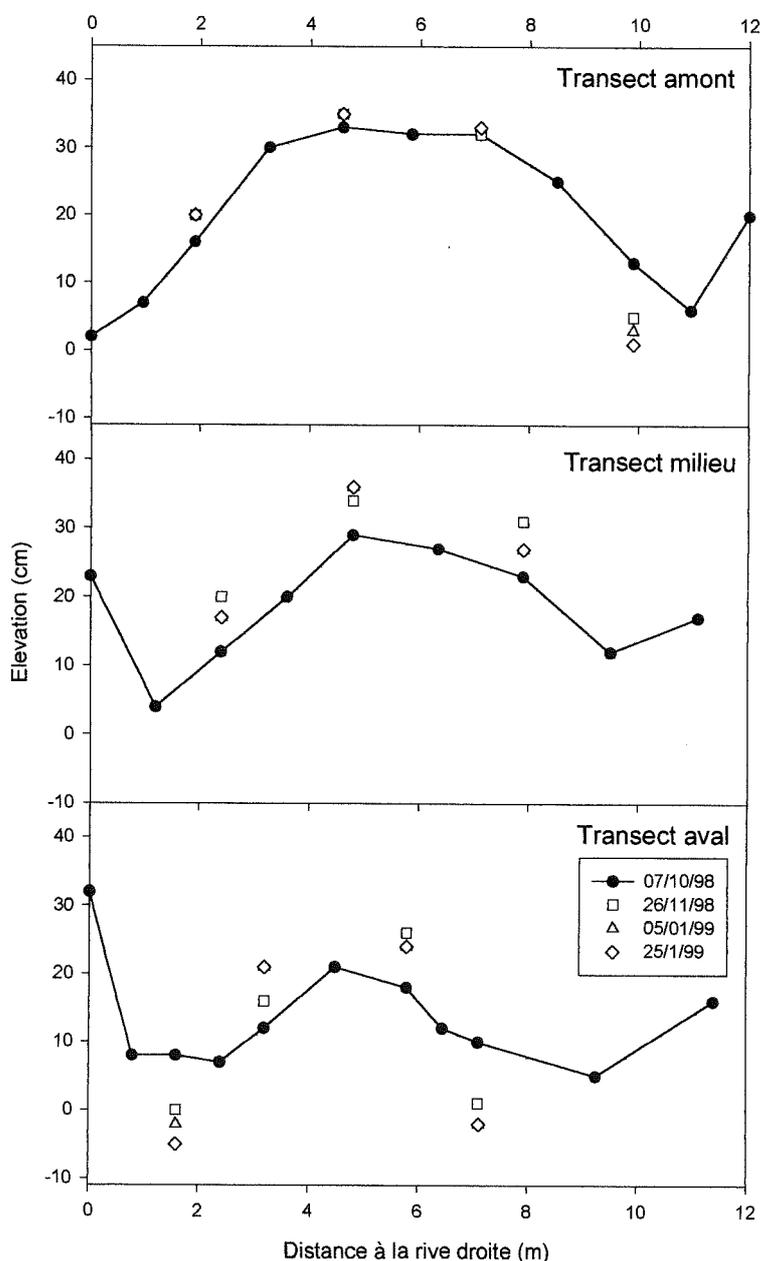


Figure 6. Évolution du banc de gravier-frayères du site « carrière » en réponse aux différentes crues de l'Aisne survenues pendant la période allant du 7/10/98 au 25/1/99. Observations réalisées au niveau de trois profils transversaux distants de 6 m l'un de l'autre.

Tableau 3. Structure granulométrique (M_y = taille moyenne des particules et F_i = fredle index) des couches de surface et sous-jacentes au niveau des deux frayères à ombre étudiées dans l'Aisne au 02/12/98, 05/01/99 et 10/03/99

		« Blaude »		« Carrière »	
		Surface	Sous-couche	Surface	Sous-couche
02/12/98	M_y (mm)	46,04	13,92	75,63	45,45
	F_i (mm)	25,01	3,7	49,54	19,25
05/01/99	M_y	34,15	7,64	71,95	17,49
	F_i	20,85	2,16	51,91	5,94
10/03/99	M_y	64,83	16,71	97,89	47,6
	F_i	43,65	6,07	89,70	21,15

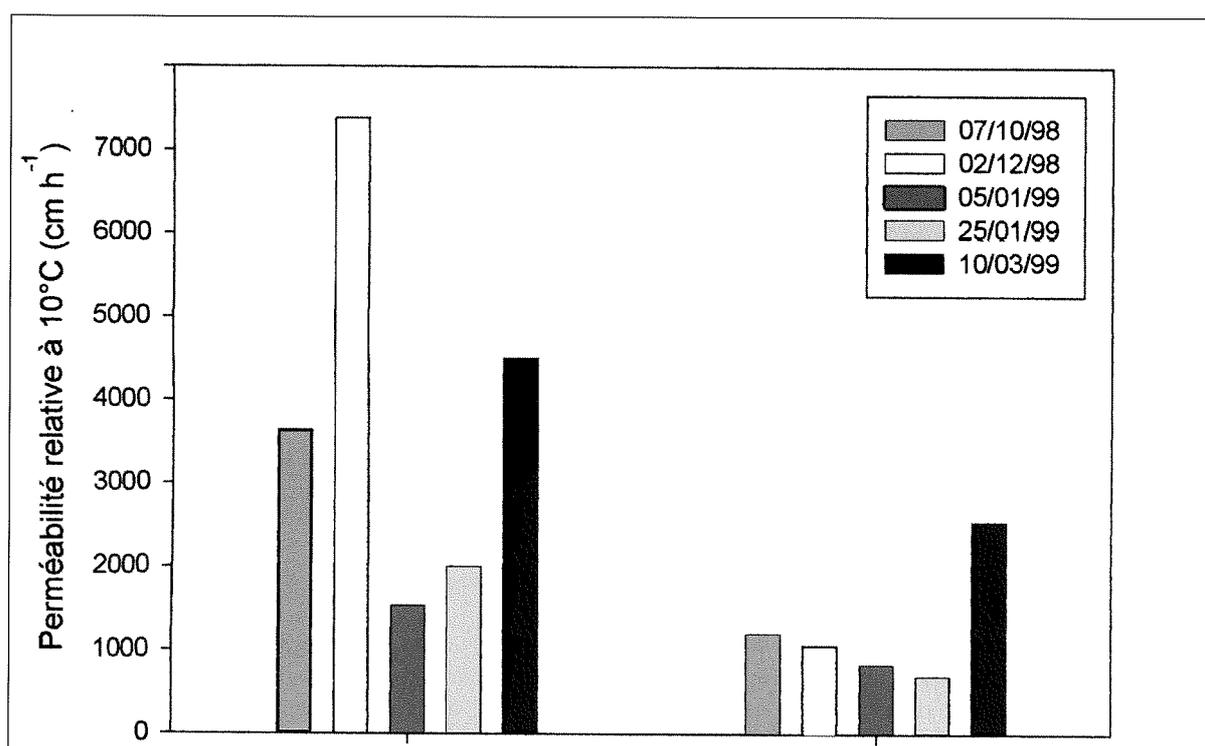


Figure 7. Évolution temporelle de la perméabilité du substrat dans les deux frayères à ombre étudiées dans l'Aisne. Les valeurs présentées correspondent à la moyenne de deux mesures ponctuelles par site et sont ramenées à une valeur de perméabilité standard à 10° C.

dans la zone profonde (> 1 m) située directement à l'amont du barrage de Bomal (barrage oblique à 600 m de la confluence avec l'Ourthe). La taille moyenne (M_y) des particules était de 93,0 mm dans la couche de surface et de 27,6 mm dans la couche sous-jacente, pour une perméabilité de 5 330 cm.h⁻¹. Le dépôt est venu combler la petite retenue de telle sorte que sa partie haute était située au niveau de la crête du barrage. Cette observation donne un aperçu de l'ampleur du caractère mobilisateur des crues enregistrées dans l'Aisne et des caractéristiques qui définissent un dépôt nouvellement formé.

Par ailleurs, les mêmes crues ont déposé sur le pan en béton du barrage des éléments de taille importante (diamètre moyen = 117 mm; 71-193 mm; n = 6) et de nature aussi variée que des galets roulés, un pavé de rue ou le fragment d'un mur en brique. Cette observation permet de se faire une idée de la taille des particules transportées dans l'Aisne lors des crues débordantes.

En ce qui concerne le flux de la charge de fond, il ressort de ces observations que le débit mobilisateur correspond à environ 0,7 fois le débit à plein bord à la station de Juzaine et que la taille du matériau mobilisé atteint 70 mm. Ceci rejoint les observations réalisées à partir des sites de marquage : suite à la crue du 26/12/1999 (14,3 m³.s⁻¹ à la station de Juzaine), la plupart des éléments ont été mobilisés, à l'exception de quelques éléments dont le diamètre dépassait 140 mm; un tri hydraulique s'était produit vers l'aval, sur une distance de 20 mètres et les éléments mobilisés sur une plus grande distance avaient une taille maximale de 70 mm.

Il faut cependant relativiser l'ampleur du remaniement total des dépôts observés lors d'événements individuels. En effet, l'analyse des scories dans le secteur aval montre que la taille moyenne des 10 plus grosses scories transportées sur une longue distance est de l'ordre de 60 mm. Ainsi, à une échelle temporelle plus large, il se produit donc bien un tri hydraulique; en d'autres termes, la mobilisation d'éléments d'une taille supérieure résulte plutôt d'une déstabilisation temporaire ou d'un réagencement de dépôts, mais elle ne constitue pas véritablement la compétence effective de la rivière. Par ailleurs, en analysant la distance moyenne parcourue par les scories depuis le moment où les hauts-fourneaux se sont implantés dans la vallée de l'Aisne, on obtient une vitesse de progression de 1,4 km par siècle. Toutefois, cette valeur est plus que probablement sous-estimée dans la mesure où la proximité des sites de rejets empêche de localiser un front de progression; dans ce cas, le mélange des scories provenant de forges différentes ne permet plus de déterminer l'origine de ces scories.

Enfin l'analyse des dragages montre que l'Aisne est une rivière animée d'une dynamique active : le taux de renouvellement des formes est en moyenne de 2 à 3 ans,

ce qui est rapide comparativement à ce qui a été mis en évidence sur l'Ourthe. Les quantités transportées atteignent 2,1 à 2,5 t.km².an⁻¹ dans l'Aisne inférieure (Houbrechts, 2000), ce qui rejoint les valeurs de débit solide spécifique de rivières ardennaises de taille comparable et à pente assez forte, telles que la Wamme (Petit et al., 1996).

IV. DISCUSSION

Les expériences dont les résultats sont présentés dans cet article ont été menées sur une période d'environ 6 mois (octobre 1998 à mars 1999) durant laquelle le débit de l'Aisne a été influencé par une pluviométrie très anormalement abondante (Van Diepenbeeck, 1999). Il en est résulté une succession de crues de faible récurrence (généralement proches du plein bord et, en tous cas, nettement inférieures à la crue quinquennale). Toutefois, ces crues se sont toutes produites en saison hivernale, rejoignant en cela le schéma classique du régime pluvial océanique tel que défini par Pardé (1968). En d'autres termes, vis-à-vis des habitats de poissons, une période caractérisée par une importante crue estivale (comme en 1980) aurait été bien plus exceptionnelle.

Cette précision étant apportée, il ressort de cette étude que les bancs caillouteux qui constituent l'habitat de reproduction de l'ombre commun ont été soumis à de fréquentes et importantes modifications. Ces modifications touchent autant à la qualité (structure granulométrique, colmatage et perméabilité) qu'à la disponibilité de l'habitat de reproduction de l'espèce et ont donc un impact potentiel sur son succès reproducteur.

Pour rappel, le succès reproducteur optimal d'une population donnée de poissons pondueurs sous gravier n'est atteint que si la ponte et la phase de vie sous gravier des embryons et des larves se déroulent sous certaines conditions du milieu. Premièrement, la population de géniteurs doit avoir accès à un nombre suffisant de sites qui rencontrent leurs exigences en termes de surface, d'écoulement et de granulométrie du substrat (Sempeki et Gaudin, 1996 pour *Thymallus thymallus*) et qui leur permettent d'exprimer leurs comportements reproducteurs. Deuxièmement, la survie des embryons enfouis dans le substrat est liée à une bonne circulation de l'eau interstitielle (White, 1990) et à une stabilité du substrat d'incubation (Carling, 1987; Devries, 1997).

Dans l'Aisne, le seuil de débit au-delà duquel les bancs de gravier-frayères (seuils transversaux et bancs de convexité) sont mobilisés et remaniés est situé, d'après nos observations, aux alentours de 15 m³.s⁻¹. Dans les deux sites étudiés et pour les deux crues mobilisatrices pour lesquelles nous avons des observations, les modifications des frayères ont été dans le sens d'une amélioration de leur qualité dans le milieu d'incubation : augmentation de la taille moyenne des particules formant la cou-

che sous-jacente et meilleure perméabilité. Dans l'Aisne, de telles crues possèdent donc potentiellement une fonction écologique bénéfique de nettoyage et de renouvellement des frayères. Ainsi, des œufs d'ombre expérimentalement implantés le 4 avril 1999 dans le gravier de frayères potentielles, dont le site « Blaude », ont évolué de manière très favorable, donnant à l'émergence au début mai une survie moyenne de l'ordre de 47 % (Parkinson et Philippart, 2001). Toutefois, cette conclusion sur l'effet bénéfique de telles crues se base sur l'observation de seulement deux crues morphogènes en deux sites ponctuels et nécessite d'être étayée par des observations supplémentaires. En effet, d'autres études ont montré que si la mobilisation du lit joue un rôle capital dans la modification de sa structure granulométrique, notamment en modifiant la quantité de sédiments fins présents dans la couche sous-jacente, cette modification ne va pas toujours dans le sens d'une augmentation de la porosité du dépôt (Lisle, 1989). Le transport et le dépôt conjoints au même endroit des particules caillouteuses et des sédiments fins (sables) peuvent entraîner la formation d'un banc qui localement contient de grandes quantités de sédiments fins (Lisle, 1989). La ségrégation opérée entre la sédimentation des particules grossières et fines qui constituent un banc semble liée à la quantité de sédiments fins transportés pendant la crue (Iseya et Ikeda, 1987).

La profondeur d'érosion mesurée dans les bancs de gravier étudiés en dehors de la période de reproduction de l'ombre est en moyenne de 1 à 3 cm, mais elle peut atteindre un maximum de 10 à 14 cm pour une crue légèrement inférieure au débit à plein bord (crue du 26/11/98) (Tableau 2). Une telle épaisseur de remaniement correspond à 2 fois le D_{50} du matériel de surface et semble être nettement supérieure à celle proposée par Hoey et Ferguson (1994) qui considèrent l'épaisseur de la couche active égale à 2 fois le D_{84a} (l'indice a se référant au diamètre de l'ensemble de la couche active comprenant à la fois la couche de surface et de subsurface). Cette valeur est également largement supérieure à la profondeur d'enfouissement des œufs observée chez l'ombre (± 5 cm). Dans l'Aisne, les sites de ponte de l'ombre pourraient donc être détruits, en période d'incubation des œufs et de développement des larves sous gravier en fin mars-avril, pour des débits de l'ordre de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dont la récurrence est seulement de 0,6 an (sur base de la série partielle). Pour des débits nettement supérieurs tels que ceux observés fin février-début mars 1999 (environ $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ avec une récurrence de l'ordre de 2 ans, sur base de la série partielle), il est probable que l'entière du matériel constituant les bancs de gravier soit mis en mouvement, ce qui détruirait encore plus sûrement les pontes enfouies.

La dernière crue observée, celle de début mars 1999, a par ailleurs provoqué un accroissement important de la taille moyenne des particules formant la couche de surface du banc-frayère du site « carrière ». En avril 1999,

aucun géniteur n'a été vu se reproduisant sur ce site, pourtant utilisé en 1998 dans des conditions de hauteur d'eau comparables. Cet abandon est vraisemblablement lié à la modification de la granulométrie du dépôt qui ne rencontrait plus, après la crue, les exigences de l'ombre en terme de microhabitat de reproduction. Les crues relativement importantes influencent donc, dans l'Aisne, le nombre d'habitats de reproduction disponible en déplaçant les sites favorables.

Pour des débits inférieurs au seuil de mobilisation, l'évolution globale des frayères va dans le sens d'une diminution de leur qualité pour les poissons lithophiles du fait d'une diminution de la perméabilité via un accroissement de la quantité de sédiments fins présents dans la couche sous-jacente. Cette détérioration écologique de l'habitat est à mettre en relation avec les quantités importantes de sédiments fins qui sont transportés de manière subcontinue par la rivière pour des débits moyens ($3\text{-}10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et qui s'infiltrent dans les interstices du substrat. Toutefois, une grande hétérogénéité spatiale de ce phénomène de colmatage a pu être observée dans l'Aisne (valeurs observées dans un même site sur une même période allant de $8,73$ à $41,30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) comme dans d'autres rivières (Adams et Beschta, 1980; Lisle, 1989), ce qui pondère l'impact négatif de cette forme de sédimentation sur le succès reproducteur des poissons pondeurs sous gravier.

Une grande variabilité spatiale a pu également être observée quant à l'ampleur des remaniements subis par les bancs de gravier-frayères lors des crues. Cette variabilité se marque autant entre les deux sites étudiés qu'au sein d'un même site. D'un point de vue biologique, cette variabilité a pour avantage de limiter l'impact destructeur d'une crue survenant pendant le stade de vie sous gravier des embryons, en épargnant certaines pontes (Lisle, 1989). Par ailleurs, le banc-frayère du site « carrière » a montré une stabilité plus faible à l'érosion que celui du site « Blaude ». Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que le fond du lit a été artificiellement perturbé dans le site « carrière » lors de la construction du pont en 1997. Le dépôt présent à l'aval du pont, constitué et structuré par l'intervention humaine, aurait donc été remanié lors des crues morphogènes successives jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint entre la taille des particules du dépôt et les forces tractrices s'y exerçant lors des épisodes de haut débit. Cette hypothèse est en accord avec l'augmentation de la taille des particules faisant suite aux crues du 21/2 et du 3/3/99, et la tendance observée, via les barres d'érosion, à la formation d'un banc central entouré par deux chenaux plus profonds.

Les données présentées dans cette étude concernent l'ombre commun, mais elles peuvent sans trop de difficulté être transposées à la truite commune (*Salmo trutta*), autre salmonidé pondeur sous gravier présent dans

l'Aisne et se reproduisant dans le secteur étudié. À condition de prendre en compte les exigences différentes des deux espèces en terme de saisonnalité de la reproduction (novembre-février chez la truite, versus mars-avril chez l'ombre) et de microhabitat de ponte (voir Shirvell et Dungey, 1983 pour *Salmo trutta*), l'impact de la dynamique de modification des bancs de gravier sur leur succès reproducteur répond aux mêmes critères.

CONCLUSION

Le succès de la reproduction d'espèces de poissons lithophiles (saumon, truite, ombre) dépend de la disponibilité de bancs de gravier, de leur qualité écologique (bonne circulation de l'eau interstitielle) et de leur stabilité au moment des crues. Cette étude montre que les bancs de gravier de l'Aisne sont mobilisables pour un débit seuil d'environ $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (égal à 0,7 fois le débit à plein bord estimé à $20\text{-}22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, en débit moyen journalier) et que la taille des matériaux mobilisables atteint 70 mm. D'après les observations sur les sites à frayère à ombre, des débits de $15,3$ et $19,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ mobilisent et remanient profondément les bancs de gravier-frayères : une crue de $19,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ provoque une érosion sur une profondeur maximale de 14 cm (en moyenne de 2,6 à 6,1 cm selon les stations) telle que des poches d'œufs enfouies à 5 cm dans les sédiments seraient détruites. Une crue de $15,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ne modifie pas sensiblement la granulométrie des dépôts de la couche de surface, mais elle provoque une diminution de la taille des particules de la sous-couche. Il en résulte un colmatage du substrat et une diminution de la perméabilité, ce qui n'est pas très favorable pour les poissons lithophiles. Des crues de $27,2$ et $30,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (dont la récurrence est de l'ordre de 2 ans) remanient très profondément les bancs de gravier dans le sens d'un accroissement de la taille des particules des couches de surface et sous-jacentes; il en résulte donc une diminution du colmatage par les sédiments fins et une augmentation de la perméabilité du substrat. Mais une telle évolution du milieu physique n'est pas nécessairement favorable aux poissons, car l'augmentation de la taille des particules constituant certains dépôts de gravier peut rendre ceux-ci moins attractifs comme frayère à ombre, compte tenu des exigences particulières de l'espèce pour la granulométrie du substrat de ponte. L'étude éco-hydraulique met en évidence une grande variabilité spatiale, selon la topographie locale, de la taille des particules du substrat, de l'ampleur des remaniements subis par les bancs de gravier (stabilité à l'érosion) lors des crues, de leur degré de colmatage par les fines et de leur perméabilité. Cette grande variabilité du milieu physique est à préserver, car elle garantit aux poissons lithophiles de toujours disposer de frayères malgré une dynamique active. Les observations écologiques présentées dans cette étude concernent l'ombre commun, mais elles

peuvent sans trop de difficulté être transposées à d'autres salmonidés pondés sous gravier comme la truite commune et le saumon atlantique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient MM Daxhelet, Genin et de Thysebaert (Service des Cours d'eau Non Navigables de la Région wallonne) pour leur avoir communiqué les données limnigraphiques et les renseignements à propos des dragages.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAMS J.N. & BESCHTA R.L., 1980. Gravel bed composition in Oregon coastal streams. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 37, pp. 1514-1521.
- ALEXANDER G.R. & HANSEN E.A., 1986. Sand bedload in a brook trout stream. *N. Am. J. Fish. Manage.*, 6, pp. 9-23.
- CARLING P.A., 1984. Deposition of fine and coarse sand in an open-work gravel bed. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 41, pp. 263-270.
- CARLING P.A., 1987. Bed stability in gravel streams, with reference to stream regulation and ecology. *River channels : environment and process*, K. Richards (ed.), pp. 321-347.
- CHAPMAN D.W., 1988. Critical review of variables used to define effects of fines in redds of large salmonids. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 117, pp. 1-21.
- CRISP D.T., 1996. Environmental requirements of common riverine European Salmonid fish species in fresh water with particular reference to physical and chemical aspects. *Hydrobiologia*, 323, pp. 201-221.
- DEVRIES P., 1997. Riverine salmonid eggs burial depths : review of published data and implications for scour studies. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 54, pp. 1685-1698.
- D'HULSTÈRE D. & PHILIPPART J.C., 1982. Observations sur le comportement d'éclosion et de post-éclosion chez l'ombre commun, *Thymallus thymallus* (L.). *Cahier d'éthologie appliquée*, 2 (1), pp. 63-80.
- DUNCAN S.H. & WARD J.W., 1985. A technique for measuring scour and fill of salmon spawning riffles in headwater streams. *Water Resour. Bull.*, 21 (3), pp. 507-511.
- HOEY T.B. & FERGUSON R., 1994. Numerical simulation of downstream fining by selective transport in gravel bed rivers : Model development and illustration. *Water Resour. Res.*, 30, pp. 2251-2260.
- HOUBRECHTS G., 2000. *Utilisation des macroscories comme indicateur du transport de la charge de fond des rivières de la « Terre de Durbuy »*, Mémoire licence Sc. Géog., Univ. Liège, 137 p.
- ISEYA F. & IKEDA H., 1987. Pulsations in bedload transport rates induced by a longitudinal sorting : a flume study using sand and gravel mixture. *Geogr. Ann.*, 69 (A), pp. 15-27.
- KELLERHALS R. & BRAY D., 1971. Sampling procedures for coarse fluvial sediments. *Journal of Hydraulics Division, Proceedings of America Society of civil Engineers*, 97, pp. 1165-1180.
- KONDOLF G.M., CADA G.F., SALE M.J. & FELANDO

- T., 1991. Distribution and stability of potential salmonid spawning gravels in steep boulder-bed streams of the eastern Sierra Nevada. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 120, pp. 177-186.
- LAPOINTE M., EATON B., DRISCOLL S. & LATULIPPE C., 2000. Modeling the probability of salmonid egg pocket scour due to floods. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 57, pp. 1120-1130.
- LARONNE J.B. & CARSON M.A., 1976. Interrelationship between bed morphology and bed material transport for a small gravel-bed channel. *Sedimentology*, 23, pp. 67-85.
- LISLE T.E., 1989. Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels. North Coastal California. *Water Resour. Res.*, 25 (6), pp. 1303-1319.
- LISLE T.E. & LEWIS J., 1992. Effects of sediment transport on survival of salmonid embryos in a natural stream : a simulation approach. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 49, pp. 2337-2344.
- LOTSPEICH F.B. & ÉVEREST F.H., 1981. A new method for reporting and interpreting textural composition of spawning gravel. *U.S. Forest Service Research Note*, PNW-139.
- MANN R.H.K., 1996. Environmental requirements of European non-salmonid fish in rivers. *Hydrobiologia*, 323, pp. 223-235.
- MASSA F., GRIMALDI C., BAGLINIERE J.L. & PRUNET P., 1998. Évolution des caractéristiques physico-chimiques de deux zones de frayères à sédimentation contrastée et premiers résultats de survie embryo-larvaire de truite commune (*Salmo trutta*). *Bull. Fr. Pêche & Piscicult.*, 350-351, pp. 359-376.
- MONTGOMMERY D.R., BUFFINGTON J.M., PETERSON N.P., SCHUETT-HAMES D. & QUINN T.P., 1996. Stream-bed scour, egg burial depths, and the influence of salmonid spawning on bed surface mobility and embryo survival. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 53, pp. 1061-1070.
- PARDE M., 1968. *Fleuves et Rivières*, A. Colin, Paris, 241 p.
- PARKINSON D., PETIT F., PERPINIEN G. & PHILIPPART J.C., 1999. Habitat de reproduction des poissons et processus géomorphologiques dans des rivières à fond caillouteux : Essai de synthèse et applications à quelques rivières du bassin de la Meuse. *Bull. Soc. Géog. Liège*, 36, pp. 31-52.
- PARKINSON D., PHILIPPART J.C. & BARAS E. 1999. A preliminary investigation of spawning migrations of grayling in a small stream as determined by radio-tracking. *J. Fish. Biol.*, 55, pp. 172-182.
- PARKINSON D. & PHILIPPART J.C., 2001. Contrôle environnemental de la survie des embryons d'ombre commun (*Thymallus thymallus*) pendant la période de vie sous gravier. En préparation (36 pages + 2 tableaux et 7 figures).
- PAYNE B. & LAPOINTE M., 1997. Channel morphology and lateral stability: effects on distribution of spawning and rearing habitat for Atlantic salmon in a cobble-bed river. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 54, pp. 2627-2636.
- PETIT F. & DAXHELET C., 1989. Détermination du débit à pleins bords et de sa récurrence dans différentes rivières de moyenne et haute Belgique. *Bull. Soc. Géog. Liège*, 25, pp. 69-84.
- PETIT F. & PAUQUET A., 1997. Bankfull discharge recurrence interval in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, pp. 685-693.
- PETIT F., PAUQUET A. & PISSART A., 1996. Fréquence et importance du charriage dans des rivières à charge de fond caillouteuse. *Géomorphologie*, 2, pp. 3-12.
- PETIT F., PERPINIEN G. & DEROANNE C., 2000. Détermination des puissances spécifiques critiques dans des rivières à charge de fond caillouteuse. *Revue géographique de l'Est*, 40 (1-2), pp. 59-65.
- SCRIVENER J.C. & BROWNLEE M.J., 1989. Effects of forest harvesting on spawning gravel and incubation survival of chum (*Onorhynchus keta*) and coho salmon (*O. kisutch*) in Carnation Creek, British Columbia. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 46, pp. 684-696.
- SEMPESKI P. & GAUDIN P., 1991. Habitat selection by grayling, I. Spawning habitats. *J. Fish. Biol.*, 47, pp. 256-265.
- SHIRVELL C.S. & DUNGEY R.G., 1983. Microhabitat chosen by brown trout for feeding and spawning in rivers. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 112, pp. 355-367.
- STALNAKER C.B., BOVEE K.D. & WADDLE T.J., 1996. Importance of the temporal aspects of habitat hydraulics to fish population studies. *Regul. Riv. : Res. & Manage.*, 12, pp. 145-153.
- TERHUNE L.D.B., 1958. The Mark VI groundwater standpipe for measuring seepage through salmon spawning gravel. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 15 (5), pp. 1027-1063.
- VAN DIEPENBEECK M., 1999. Bilan climatologique saisonnier. *Ciel et Terre*, 115 (4), pp. 169-170.
- WHITE D.S., 1990. Biological relationships to convective flow patterns within streambeds. *Hydrobiologia*, 196, pp. 149-158.
- YOUNG M.K., HUBERT W.A. & WESCHE T.A., 1991. Selection of measures of substrate composition to estimate survival to emergence of Salmonids and to detect changes in stream substrates. *North Am. J. Fish. Manage.*, 11, pp. 339-346.

Adresse des auteurs :

Denis PARKINSON
Jean-Claude PHILIPPART
Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Aquaculture
Institut de Zoologie
Université de Liège
Quai Van Beneden
B - 4020 Liège

François PETIT
Geoffrey Houbrechts
Département de Géographie physique et Quaternaire
Institut de Géographie
Université de Liège
Allée du 6 Août, 2 - Bât. 11
B - 4000 Sart Tilman, Liège