

ÉVALUATION DES PUISSANCES SPÉCIFIQUES DE RIVIÈRES DE MOYENNE ET DE HAUTE BELGIQUE

François PETIT, Eric HALLOT, Geoffrey HOUBRECHTS et Julien MOLS

Résumé

Les puissances spécifiques ont été calculées à plus de 70 stations hydrométriques situées dans des rivières dont la taille du bassin hydrographique varie d'une dizaine de km² à plus de 2 500 km². Pour effectuer ce calcul, le débit à plein bord a été identifié à chacune de ces stations, la largeur du lit mineur et la pente longitudinale de la rivière y ont été mesurées. Des relations entre taille du bassin et valeur du débit à plein bord d'une part, entre taille du bassin et largeur du lit d'autre part, ont été mises en évidence et permettent d'individualiser certaines différenciations régionales. Au niveau des puissances spécifiques, on note un contraste très net entre les rivières du sud de l'Ardenne et celles du nord de l'Ardenne pour lesquelles on observe d'ailleurs un gradient est-ouest de décroissance des puissances. Les rivières du Condroz et de l'Entre-Vesdre-et-Meuse montrent des puissances intermédiaires. Celles de Hesbaye ont des valeurs très faibles. Les puissances spécifiques justifient certains points de la dynamique évolutive des lits : en Hesbaye où les rivières développent de faibles puissances (inférieures à 15 W/m²), le tracé du lit évolue peu en plusieurs siècles. Dans le sud de l'Ardenne (puissances inférieures à 30 W/m²), les méandres sont peu actifs et le cycle de la méandration est très largement supérieur au siècle. Dans l'Entre-Vesdre-et-Meuse, (puissance de l'ordre de 30 à 40 W/m²), les méandres libres sont actifs et on y observe des possibilités de réajustement du lit suite à des aménagements anthropiques. Nos observations s'écartent cependant de certaines valeurs-seuil proposées dans la littérature. Ainsi, le Geer (Hesbaye), malgré une puissance inférieure à 15 W/m², peut se réajuster et créer une méandration secondaire face à des contraintes extérieures. Dans des rivières telles que l'Ourthe en Famenne, malgré des puissances relativement élevées (supérieures à 50 à 70 W/m²), le cycle de la méandration est supérieur au siècle. Mais, toujours en Famenne, on observe une tendance au tressage alors que les puissances sont nettement inférieures à la valeur seuil proposée par la littérature (puissance supérieure à 100 W/m²). Enfin, en Ardenne même, lorsque l'on atteint un seuil voisin de 100 W/m², on passe d'un système à méandres libres actifs à un système à lit sinueux (voire subrectiligne) à fond plat qui tend à se rapprocher du *step-pool-system*.

Mots-clés

Puissance spécifique, débit à plein bord, style fluvial, typologie régionale, méandres, *step-pool system*

Abstract

Specific stream powers were calculated at more than 70 discharge stations along rivers with catchments between 10 and 2 500 km². In order to calculate the stream power, bankfull discharge, average slope and width were calculated at each station. The relationship between, on one hand, the size of the catchments and the bankfull discharge and, on the other, the size of the catchments and the width of the channels were highlighted. These allow several regional differentiations to be highlighted. With regard to the specific stream power, there is a clear contrast between the rivers from the South and the North Ardenn which show an East-West gradient of decreasing stream power. Rivers from Condroz and Entre-Vesdre-et-Meuse have intermediary values. Rivers from Hesbaye have very low stream powers. Stream power values partly account for the evolution of the river bed dynamics : in Hesbaye, where the rivers have low stream power (less than 15 W/m²), the river's course is rather stable for a few centuries. In the South Ardenn (stream power lower than 30 W/m²), meanders are quite active and the meandering cycle is longer than a century. In the Entre-Vesdre-et-Meuse (stream power between 30 and 40 W/m²), meanders are active and the river is able to readjust following anthropogenic constructions (deflectors). However, our observations deviate from threshold values proposed in the literature. Thus, the Geer (Hesbaye) is able to readjust and to create a secondary meandering following log-jams edifications, despite a stream power lower than 15 W/m². In the rivers such as the Ourthe in Famenne, despite rather high stream power values (higher than 50 to 70 W/m²), the meandering cycle is longer than a century. But, still in Famenne, braided channels are observed whereas the stream powers are clearly lower than the threshold proposed in the literature (stream

power higher than 100 W/m²). Finally, in Ardenn, when we reach a threshold of 100 W/m², rivers develop an active low sinuosity system in place of an active free meander system. This active low sinuosity system is comparable to a step-pool system.

Keywords

Specific stream power, bankfull discharge, regional typology, meanders, step-pool system

INTRODUCTION

La puissance spécifique qui représente en quelque sorte la capacité de travail qu'une rivière peut effectuer, est une notion introduite assez récemment en géomorphologie et, initialement, dans la perspective d'une évaluation du transport solide (Bagnold, 1966, 1977). Depuis lors, elle a trouvé d'autres champs d'application, principalement en vue d'appréhender l'activité des rivières en ce qui concerne les formes et la dynamique des méandres (Ferguson, 1981 ; Bravard, 1991) ou la possibilité de réaction et d'adaptation des rivières en réponse à des travaux d'aménagement (Brookes, 1988). Par ailleurs, la puissance spécifique est maintenant couramment utilisée comme facteur de discrimination des lits fluviaux, notamment pour l'apparition du tressage (Van den Berght, 1995). Plus récemment, la distance parcourue par la charge de fond mobilisée a été mise en relation avec l'excès de puissance spécifique par rapport à la puissance spécifique critique de mise en mouvement (Hassan *et al.*, 1992 ; Gintz *et al.*, 1996). Les puissances spécifiques sont également un bon indicateur de la compétence effective des rivières, ce qui a été démontré dans les rivières ardennaises grâce à l'utilisation des scories métallurgiques (Houbrechts & Petit, 2003). Enfin, la puissance spécifique est maintenant envisagée comme critère en vue d'élaborer une typologie des rivières (Petit, 1995 ; Bernot *et al.*, 1996 ; Petit, 2000 ; Schmitt *et al.*, 2001 ; Hallot, 2004). C'est dans cette perspective que les puissances spécifiques ont été évaluées dans plus de septante stations situées principalement, mais non exclusivement, au sud du sillon Sambre-et-Meuse. Outre l'intérêt d'un point de vue typologique, ce travail nous permet de connaître les valeurs des puissances à des stations bien précises qui nous serviront de référence pour l'estimation des puissances sur des segments de rivières déterminées à partir de paramètres extraits de MNT (modèles numériques de terrain).

I. RAPPEL DES ÉQUATIONS ET MÉTHODOLOGIE

La puissance spécifique (ω exprimée en W/m²) se présente sous la forme suivante :

$$\omega = (g \rho Q S) / w$$

avec Q le débit (en m³.s⁻¹), w la largeur du lit (en m), S la pente longitudinale (en m.m⁻¹), ρ la masse volumique

du fluide (en kg.m⁻³) et g l'accélération de la pesanteur (en m.s⁻²). Afin de permettre des comparaisons entre différentes rivières, on retient généralement comme débit, le débit à plein bord, auquel cas w est la largeur prise entre les berges au niveau du débordement. D'une façon plus générale, dans les rivières à chenaux tressés, où il est difficile de définir un débit à plein bord, on retient généralement la valeur du débit de récurrence 1,5 ans, ce qui est assez proche de la récurrence du débit à plein bord, même si des nuances doivent être apportées en fonction notamment de la nature de la charge de fond et du mode d'alimentation des rivières (Petit & Pauquet, 1997).

Le débit à plein bord a été identifié aux stations limnimétriques et limnigraphiques existantes, selon une méthodologie testée et développée précédemment (Petit & Daxhelet, 1989). Le débit à plein bord est estimé pour un tronçon de rivière grâce à des observations de terrain : il est compris entre les crues débordantes les plus faibles d'une part et les crues non débordantes les plus élevées d'autre part¹. Ces différentes observations sont ensuite confrontées aux débits mesurés à la station limnigraphique ou limnimétrique la plus proche. Sous nos latitudes, une même rivière a évidemment des valeurs du débit à plein bord croissantes qui augmentent lorsque l'on progresse de l'amont vers l'aval, de telle sorte que le débit à plein bord doit être identifié sur différents tronçons d'une même rivière, essentiellement en fonction de la disposition de ses confluent. Précisons enfin que, dans quelques cas, le débit à plein bord a dû être déterminé de façon indirecte, en appliquant une méthodologie très souvent utilisée (Petts, 1977). Elle consiste à mesurer les caractéristiques géométriques et hydrauliques du lit (pente longitudinale, vitesse moyenne, section mouillée, rayon hydraulique) à une station bien déterminée, de façon à calculer le coefficient de rugosité dans l'équation de Manning. Lorsque ce dernier est déterminé, on l'injecte ensuite dans cette même formule avec les paramètres géométriques mesurés au niveau du plein bord, de façon à calculer la vitesse moyenne ce qui permet *in fine*, connaissant la section mouillée au plein bord, de déduire le débit correspondant.

La pente longitudinale au niveau d'une station déterminée a été calculée à partir des cartes topographiques au

1/10.000° généralement sur une distance de 5 km. Précisons que des tests préalables ont été effectués en vue de garantir la précision de cette méthode, ceci de la façon suivante : sur plusieurs rivières, nous avons calculé les pentes longitudinales du fond du lit à partir de relevés effectués à une interdistance moyenne de 100 m (données issues de l'Atlas des cours d'eau), avec une distance longitudinale de référence de l'ordre de 2 km en amont des stations de mesure des débits. Nous les avons ensuite comparées avec les valeurs calculées sur les cartes topographiques. Il s'est avéré que les écarts étaient peu importants, ce qui rejoint par ailleurs les constatations faites par Demoulin (1998) dans un contexte assez semblable.

La largeur du lit mineur représente une moyenne de quinze à vingt valeurs mesurées sur le terrain, entre berges, au niveau du plein bord.

II. RIVIÈRES ÉTUDIÉES

Nous avons tout d'abord sélectionné une série de rivières à charge caillouteuse dont le bassin versant est constitué de roches imperméables. Ces rivières peuvent être schématiquement regroupées en trois ensembles distincts (Fig. 1) :

- le Sud de l'Ardenne : Sûre, Rulles, Mellier, Vierre, Semois ardennaise ;
- le Nord de l'Ardenne : Eau Noire, Houille, Lesse, Lhomme, Wamme, Ourthe supérieure, Ruisseau de la Mer, Ruisseau de Belleva, Aisne, Chavanne, Lienne, Eau Rouge, Amblève, Salm, Hoëgne, Vesdre, Schwalm ;
- Fagne-Famenne : Eau Blanche, Hermeton, Wimbe, Vachaux, Eau d'Heure, Marchette.

Ont également été retenues des rivières à charge caillouteuse à substrat plus ou moins perméable. Elles sont si-

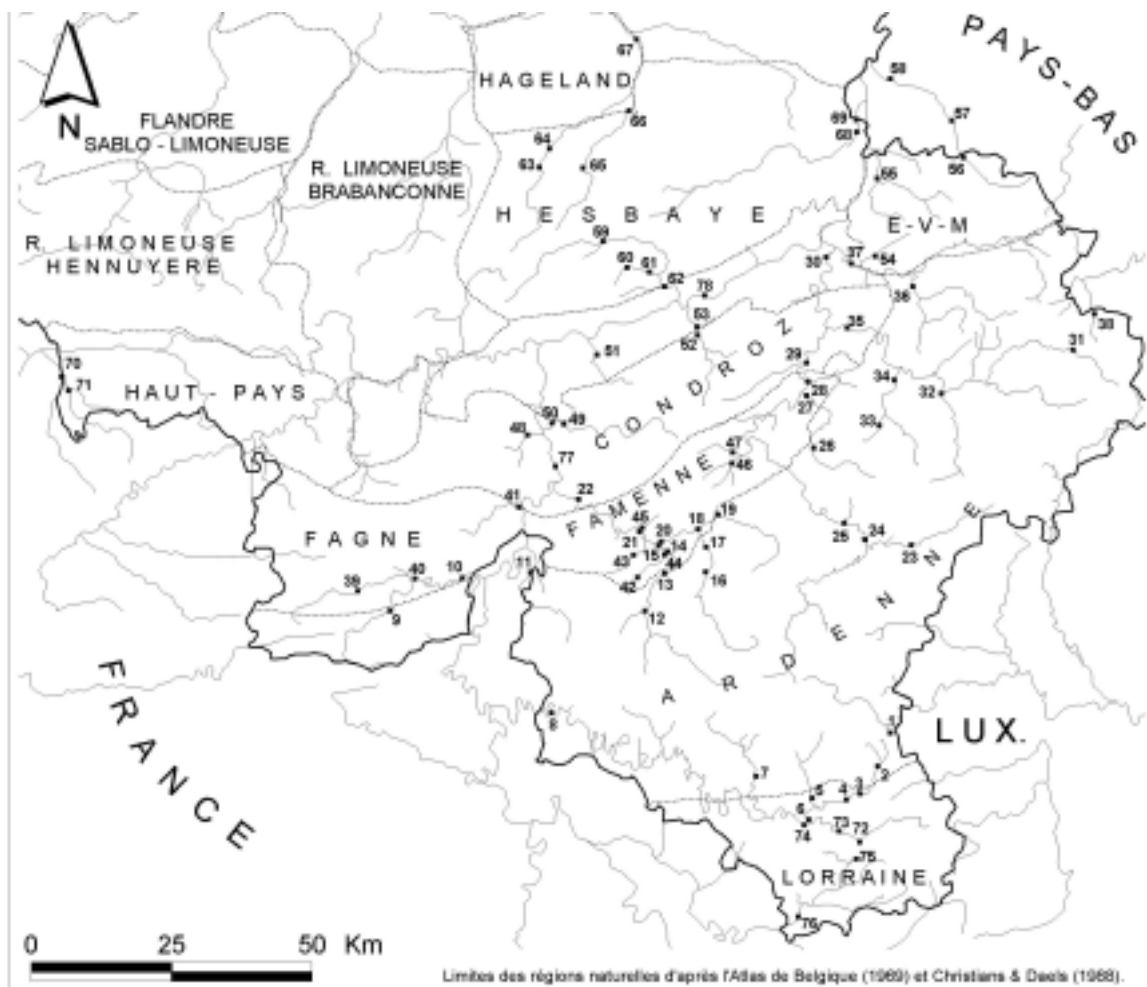


Figure 1. Carte de localisation des stations ; la numérotation renvoie au tableau 1

Tableau 1. Listes des stations

N°	Région	Rivière	Site	BV	Qb	Wb	s locale	o	Sources		
				km²	m³/s	m	m/m	W/m²			
1	ARDENNE	Sûre	Martelange	209	26	12,3	0,00220	46	Petit & Daxhelet (1989)		
2	ARDENNE	Ruiles	Forêts d'Anlier	16	1,3	3,72	0,00450	15	Petit (1984, 1987)		
3	ARDENNE	Ruiles	Habay la Neuve	48	4,8	5,2	0,00320	24	Petit & Daxhelet (1989)		
4	ARDENNE	Ruiles	Habay la Vieille	96	11	9,1	0,00230	27	Petit & Daxhelet (1989)		
5	ARDENNE	Molier	Marbais	63	9,9	8,05	0,00290	35	Petit & Daxhelet (1989)		
6	ARDENNE	Ruiles	Tintigny	220	24	12,32	0,00140	27	Petit & Daxhelet (1989)		
7	ARDENNE	Vieme	Sury	226	20	16,6	0,00132	16	Petit & Daxhelet (1989); Petit (2000)		
8	ARDENNE	Semois	Membre	1235	130	p	62,3	0,00110	23	Petit & Pauquet (1997); Gob et al. (2005)	
9	ARDENNE	Eau Noire	Couvin	178	23	14,2	0,00380	60	Vanderheyden (2003)		
10	ARDENNE	Vivon	Traignes	554	65	19,3	0,00200	66	Vanderheyden (2003)		
11	ARDENNE	Houille	Felenne	110	11,6	10,3	0,01670	185	Petit & Daxhelet (1989); Montes (1989)		
12	ARDENNE	Lesse	Davindase	301	27	17,1	0,00410	64	Louette (1995)		
13	ARDENNE	Lesse	Rostigne	345	33	16,4	0,00370	73	Louette (1995)		
14	ARDENNE	Lesse	Hani/Lesse	394	42	16,4	0,00210	53	DCENN (c. or.)		
15	ARDENNE	Lesse	Eprave	419	39	16,1	0,00190	42	Franchimont (1993)		
16	ARDENNE	Lhomme	Grupont	191	20	13,1	0,00510	76	Franchimont (1993)		
17	ARDENNE	Lhomme	Fornière	247	33	15,4	0,00400	84	Louette (1995)		
18	ARDENNE	Lhomme	Jamelle	276	27	14,4	0,00360	66	Franchimont (1993)		
19	ARDENNE	Wamme	Hangimont	80	17	11,6	0,00790	109	Louette (1995)		
20	ARDENNE	Lhomme	Eprave	474	60	15,6	0,00220	83	Franchimont (1993); obs. ter.		
21	ARDENNE	Lesse	Villers/Lesse	1090	106	27,6	0,00200	76	Franchimont (1993);		
22	ARDENNE	Lesse	Gendion	1314	115	32	0,00172	61	Halot et al. (2003)		
23	ARDENNE	Ourthe	Houffalize	179	21	13,3	0,00390	56	Louette (1995)		
24	ARDENNE	Ourthe	Nisramont	740	80	29,3	0,00283	76	DCENN (c. or.)		
25	ARDENNE	Rx Belleva	Maboge	12,5	0,8	4,61	0,04000	68	Mercenier (1973)		
26	ARDENNE	Aisne	Erezée	66	7,3	p	7,5	0,00900	66	Houbrechts (2000)	
27	ARDENNE	Aisne	Juzaine	183	23,8	p	13,2	0,00520	92	Houbrechts (2000)	
28	ARDENNE	Lembre	Palogne	53	5,7	8,5	0,01000	66	Houbrechts (2000)		
29	ARDENNE	Ourthe	Yabreux	1597	160	37,45	0,00130	54	Petit & Daxhelet (1989);		
30	ARDENNE	Ourthe	Spuheld	2691	315	60,5	0,00100	51	Pauquet & Petit (1993); Petit (2000)		
31	ARDENNE	Warche	Büpenbach	118	15	8,3	0,00420	74	Asarni et al. (1999)		
32	ARDENNE	Salm	Trois-Portes	202	24	11,7	0,00756	152	Louette (1995)		
33	ARDENNE	Chavonne	Bra	12	2,9	p	4,6	0,01020	63	Mayeras (2005)	
34	ARDENNE	Lienne	Lorck	146	16,2	p	11,3	0,01230	173	Petit & Daxhelet (1989); obs. ter.	
35	ARDENNE	Amblève	Martinviv	1044	140	34	0,00256	103	Petit & Pauquet (1997); Petit (2000);		
36	ARDENNE	Hologne	Theux	189	36,8	16,5	0,00640	140	Daspenna (1995)		
37	ARDENNE	Vesdre	Chaufontaine	677	120	27,62	0,00184	78	Petit & Daxhelet (1989)		
38	ARDENNE	Schwalm	Golpenberg	34,4	4,05	4,39	0,00790	64	Molitor (1991)		
39	FAGNE	Eau Blanche	Aubin	x	106	13,3	14	0,00310	29	Vanderheyden (2003)	
40	FAGNE	Eau Blanche	Niemes	x	254	29	17,2	0,00190	31	Vanderheyden (2003)	
41	FAGNE	Hemeton	Hastière	156	14	10,5	0,00570	75	Montes (1989); Petit (2000)		
42	FAMENNE	Ry d'Ave	Wellin	14	1,8	5,5	0,01130	36	Franchimont (1993)		
43	FAMENNE	Wimbe	Lavaux-St-Anne	93	9,9	7	0,00580	80	Franchimont (1993)		
44	FAMENNE	Ry d'Ave	Hani/Lesse	24	3,1	5	0,00570	41	Franchimont (1993)		
45	FAMENNE	Vochaux	Villers/Lesse	90	9,5	7,4	0,00330	42	Franchimont (1993)		
46	FAMENNE	Marchette	Bailorville	43	7,2	7,2	0,00238	23	Petit & Daxhelet (1989)		
47	FAMENNE	Eau d'Heure	Bailorville	66	14	9,94	0,00181	26	Petit & Daxhelet (1989); Louette (1995); Petit (2000)		
48	CONDROZ	Molignée	Wamant	121	12,6	10,1	0,00510	o	62	Montes (1989); Petit & Daxhelet (1989); Louette (1995)	
49	CONDROZ	Booc	Evrehailles	188	19	11,73	o	0,00804	o	96	Louette (1995)
50	CONDROZ	Booc	Yvoir	230	19	12,76	o	0,00601	o	88	Louette (1995)
51	CONDROZ	Sanson	Mozet	62	6	10,73	o	0,00631	o	46	Louette (1995)
52	CONDROZ	Hoyoux	Marchin	239	16,5	14,9	0,00920	100	Peeters A. (com. or.)		
53	CONDROZ	Rx Wavelinse	Banse	4,3	0,2	2,24	0,02400	21	Dave (1975)		
54	EVM	Magne	St Hackin	30,1	2,4	6,1	0,01200	46	Pirronet (1995)		
55	EVM	Benaine	Dalhem	118	13,8	10	0,00300	41	Parotte (1991); Halot et al. (2003)		
56	EVM	Gueule	Soppenaken	110	12,5	11,61	0,00440	47	Mols (2004)		
57	EVM	Gueule	Hommerich	144	14,2	17	0,00290	24	Mols (2004)		
58	EVM	Gueule	Moersen	329	17	13,21	0,00130	16	Mols (2004)		
59	HEBBAYE	Mehaigne	Ambressin	195	12	11	0,00085	9	Petit & Pauquet (1997); Perpinien (1998)		
60	HEBBAYE	Burdinale	Lamontzée	7,2	0,8	2,5	0,01200	38	Lamalle et al. (1989)		
61	HEBBAYE	Burdinale	Mameffe	26	2,2	5,2	0,01020	42	Lamalle et al. (1989)		
62	HEBBAYE	Mohaigne	Moha	345	18,1	11,25	0,00257	41	Perpinien (1998)		
63	HEBBAYE	Gr. Gette	St-Jean-Geest	141	8	10,23	0,00200	15	Hombroucks (2002)		
64	HEBBAYE	Gr. Gette	Hoggaarden	197	9	10,3	0,00180	14	Hombroucks (2002)		
65	HEBBAYE	Pt. Gette	Ophelissaem	134	4	8,29	0,00210	10	Hombroucks (2002)		
66	HEBBAYE	Pt. Gette	Zoutleeuw	276	6	10,78	0,00120	7	Hombroucks (2002)		
67	HEBBAYE	Gette	Halen	805	21	13,88	0,00045	7	Hombroucks (2002)		
68	HEBBAYE	Geer	Eben-Emael	x	452	11,9	10,36	0,00190	21	Mabille & Petit (1987)	
69	HEBBAYE	Geer	Karne	500	7	9,8	0,00090	6	Mabille & Petit (1987)		
70	HAINAUT	Annoey	Gullevain	76	6,5	8	0,00150	12	Halot et al. (2003)		
71	HAINAUT	Gr. Honnelle	Beaureux	121	9,5	14	0,00270	18	Halot et al. (2003)		
72	LORRAINE	Semois	Charlemelle	89	8,4	9,8	0,00091	8	DCENN (c. or.)		
73	LORRAINE	Semois	Étalle	124	11,5	11,4	0,00248	5	DCENN (c. or.)		
74	LORRAINE	Semois	Tintigny	378	50	16,56	0,00100	26	Petit & Daxhelet (1989); Sluse & Petit (1998)		
75	LORRAINE	Rouge Eau	St-Léger	10	0,97	m	3,01	0,01600	51	Petit & Daxhelet (1989)	
76	LORRAINE	Ton	Rouvroy	293	22	13,2	0,00220	36	Petit & Daxhelet (1989)		
77	MEUSE	Neuse	Dinant	x	12738	1000	91,5	0,00201	33	Béguel (2002)	
78	MEUSE	Neuse	Ben-Ahin	x	16846	1290	130,3	0,00020	19	obs. ter.	

m = Calculé par formule de Manning

o = Atlas des Cours d'Eau

p = Débit de pointe

x = Aménagements

tuées soit dans le Condroz (Molignée, Bocq, Samson, Hoyoux, Ruisseau de Wavelinse), soit dans l'Entre-Vesdre-et-Meuse (Magne, Berwinne, Gueule), soit dans la partie méridionale de la Hesbaye (Méhaigne et Burdinale). Ont également été analysées des rivières à charge sableuse situées essentiellement en Lorraine (Rouge Eau, Ton, Semois lorraine) et à charge limono-sableuse situées en Hesbaye (Geer et Gette).

Précisons que certaines rivières plus importantes coulent dans différentes régions naturelles mais gardent leur caractère ardennais en ce qui concerne leur charge caillouteuse et le régime des débits. C'est par exemple le cas de la Lesse (stations d'Eprave et de Villers-sur-Lesse) et de la Lhomme (à Eprave) que nous considérons comme des rivières ardennaises bien que ces stations limnigraphiques se situent en Famenne. De même, le Viroin (station de Treignes) se situe dans la bande calcaire mais garde la marque de l'influence ardennaise sous forme d'apports actuels d'une charge caillouteuse provenant de l'Ardenne, la plus grande partie de son

bassin étant par ailleurs située sur des terrains imperméables.

III. RÉSULTATS

Les valeurs des puissances et des différents paramètres qui ont servi à son calcul, de même que la superficie des bassins hydrographiques au droit des stations envisagées, sont présentées au tableau 1.

m = calculé par formule de Manning ; o = Atlas des Cours d'Eau ; p = débit de pointe ; x = aménagements

Précisons qu'une relation entre la valeur du débit à plein bord et la taille du bassin hydrographique avait déjà été mise en évidence (Petit & Daxhelet, 1989 ; Petit & Pauquet, 1997), sous la forme suivante :

$$Q_b = 0,087 A^{1,044}$$

ceci pour des rivières à charge caillouteuse développées sur substrat imperméable, c'est-à-dire essentiellement des rivières ardennaises (*sensu stricto*). Mais des nuan-

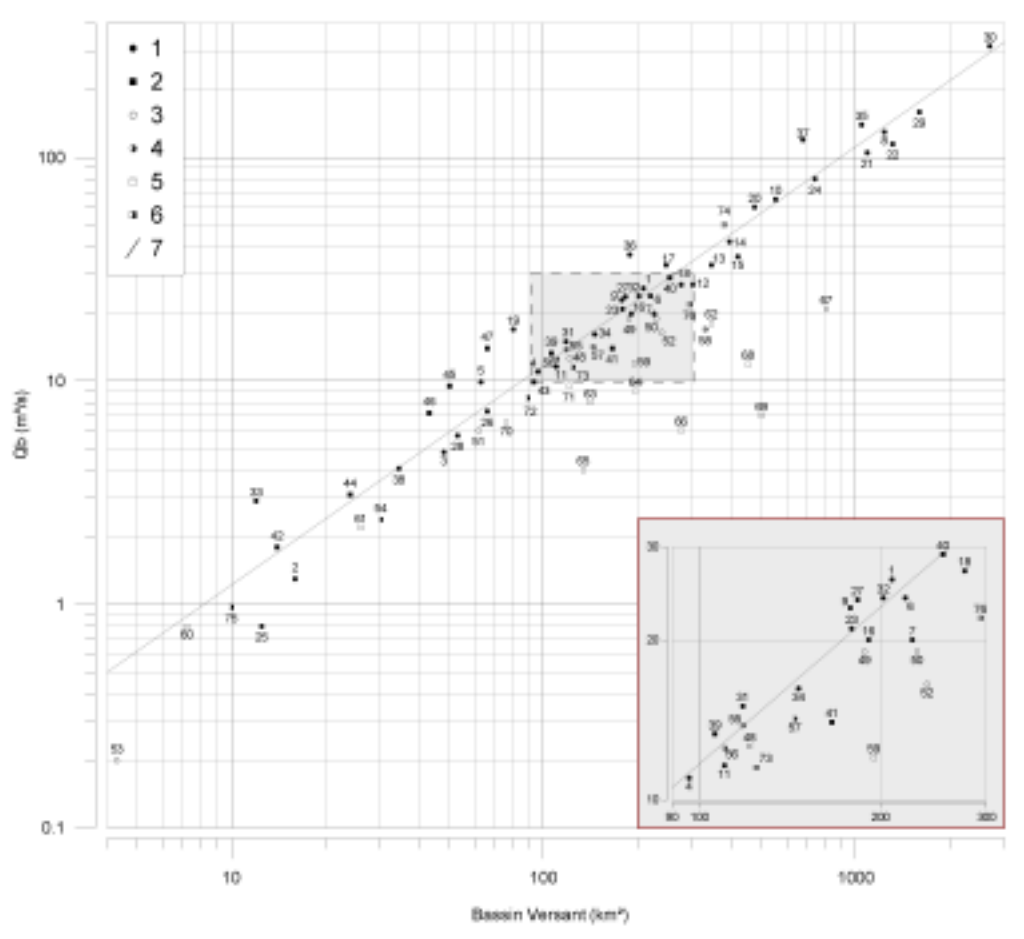


Figure 2. Relation entre la valeur du débit à plein bord et la taille du bassin hydrographique

(1) rivières à charge de fond caillouteuse sur substrat imperméable (Ardenne); (2) rivières sur substrat imperméable avec charge de fond peu importante (Fagne-Famenne) ; (3) rivières à charge de fond caillouteuse sur substrat perméable (Condroz) ; (4) rivières à charge de fond caillouteuse sur substrat partiellement imperméable (Entre-Vesdre-et-Meuse) ; (5) rivières à charge limono-sableuse sur substrat perméable (Hesbaye et Hainaut) ; (6) rivières à charge de fond sableuse sur substrat partiellement imperméable (Lorraine) ; (7) Relation établie à partir des rivières à charge caillouteuse sur substrat imperméable (Ardenne, stations 1 à 38) : $Q_b = 0,128 A^{0,981}$

ces régionales avaient déjà été épinglées puisque, par exemple, des rivières à charge de fond sableuse (rivière de Lorraine) ou limoneuse (rivière de Hesbaye) ainsi que des rivières à débit de base dominant s'écartent de cette relation. Toujours dans cette relation, les rivières de Famenne montrent, toutes choses étant égales, une plus grande contenance du lit, dans la mesure où elles peuvent s'inciser plus facilement du fait de l'absence de charge caillouteuse grossière et de la présence d'un substrat friable.

Depuis que cette relation a été proposée, il s'est produit un nombre assez important d'épisodes hydroclimatologiques que nous avons eu l'occasion de suivre et des débits à plein bord ont été observés dans des stations supplémentaires, ce qui a permis d'affiner les valeurs du débit à plein bord de certaines stations et d'en proposer à d'autres. Le nombre de données collectées dans cette étude est donc beaucoup plus important et nous comptons, avant toute chose, repreciser la relation présentée ci-dessus.

Nous tenterons ensuite de mettre en évidence une relation entre la largeur au plein bord et la taille du bassin versant pour, finalement, traiter les données de puissance.

A. Relation entre le débit à plein bord et la taille du bassin hydrographique

Dans le cas des rivières à charge caillouteuse développées sur substrat imperméable, ce qui représente essentiellement les rivières ardennaises (*sensu stricto*), il se dessine une relation fiable qui prend la forme suivante (Fig. 2) :

$$Q_b = 0,128 A^{0,981} \quad (R^2 = 0,961 ; n = 38)$$

Cette relation est peu différente de celle mise en évidence auparavant. Remarquons toutefois que plusieurs rivières de l'Ardenne du nord-est présentent des valeurs élevées du débit à plein bord, notamment la Chavanne (33), l'Amblève (35), la Hoëgne (36), la Vesdre (37), sans que l'on puisse généraliser puisque la Salm (32), la Lienne (34) et l'Aisne (26 et 27) ont des valeurs très proches de celles déduites de la régression.

Toutes les rivières du Condroz (48-53) ont des débits à plein bord plus faibles que ceux attendus par régression, de même que celles de l'Entre-Vesdre-et-Meuse (54-58) et de Lorraine (72-76). Cette différence est encore plus flagrante quand on envisage les rivières du Hainaut (70-71) et surtout de Hesbaye (59-69). Sur les vingt-neuf rivières reprises dans ces cinq régions, on ne note qu'une exception, la Semois à Tintigny (74). Précisons cependant que cette station est située en aval de la confluence avec la Rulles et que cette dernière, par son caractère ardennais, influence le comportement de la Semois par l'injection d'une charge de fond plus grossière mais surtout par un régime hydrologique plus contrasté.

Les plus faibles valeurs du débit plein bord des rivières situées dans les régions à substrat perméable résultent plus d'un problème de régime hydrologique que de contenance et de morphologie du lit liées à la taille de la charge de fond puisque les rivières à charge caillouteuse du Condroz ont des débits plein bord moindres que les rivières ardennaises. En effet, il y a tout d'abord l'effet tampon du substrat sur les débits de pointe qui se trouvent donc fortement atténués et sont donc plus faibles, à taille de bassin égale. Dans certains cas, il faut y voir en plus une faiblesse généralisée des écoulements qui, dans les rivières de Hesbaye (Gette et Geer par exemple), résulte de précipitations nettement moins importantes d'une part, de l'importance des prélèvements anthropiques d'autre part. C'est également le cas de certaines rivières du Condroz où ces prélèvements sont loin d'être négligeables (Bocq et Hoyoux).

En revanche, les rivières de Fagne-Famenne (39-47) montrent, à des degrés divers, des valeurs du débit à plein bord plus importantes. C'est spécialement le cas de l'Eau d'Heure (47), de la Marchette (46) et du Vachaux (45) qui semblent être des rivières typiques de la Famenne. Ceci se marque moins dans le cas de la Wimbe (43) et du Ry d'Ave (42 et 44), du fait que ces rivières ont, au moins partiellement, un héritage ardennais. Comme il a déjà été évoqué ci-dessus, les valeurs élevées du débit à plein bord qui caractérisent les vraies rivières de Fagne-Famenne, résultent du fait qu'elles coulent sur un substrat peu résistant qui permet une incision plus forte, ce qui ressort d'ailleurs de certains paramètres géométriques du lit tel que le rapport w/d (largeur/profondeur), qui est systématiquement inférieur à celui des rivières ardennaises (Petit & Pauquet, 1997).

Deux précisions doivent encore être apportées concernant certaines valeurs reprises au tableau 1.

En ce qui concerne le débit à plein bord de la Meuse, il convient de rappeler que le fleuve a subi des aménagements dont les premiers remontent au XIX^e siècle (Suttor, 1989). Les plus importants ont été réalisés entre Namur et Liège, suite à la crue catastrophique de 1926 et, plus récemment, en vue d'augmenter le gabarit de navigation. Malgré cela, il existe encore quelques endroits où la Meuse déborde assez régulièrement. Il s'agit de Dinant d'une part, de Ben Ahin d'autre part. Lorsque des débordements (ou des alertes de crue débordante) sont signalés à ces endroits, nous avons pris en compte les débits mesurés par le Ministère de l'Équipement et des Transports (MET), respectivement à Heer-Agimont (en y ajoutant le débit de la Lesse à Gendron) pour Dinant d'une part, à Ampsin Neuville pour Ben Ahin d'autre part. Nous sommes conscients du fait que ces valeurs restent approximatives mais précisons néanmoins qu'elles sont du même ordre de grandeur que la valeur du débit à plein bord de la Moselle ($Q_b = 1\,004 \text{ m}^3/\text{s}$) mise

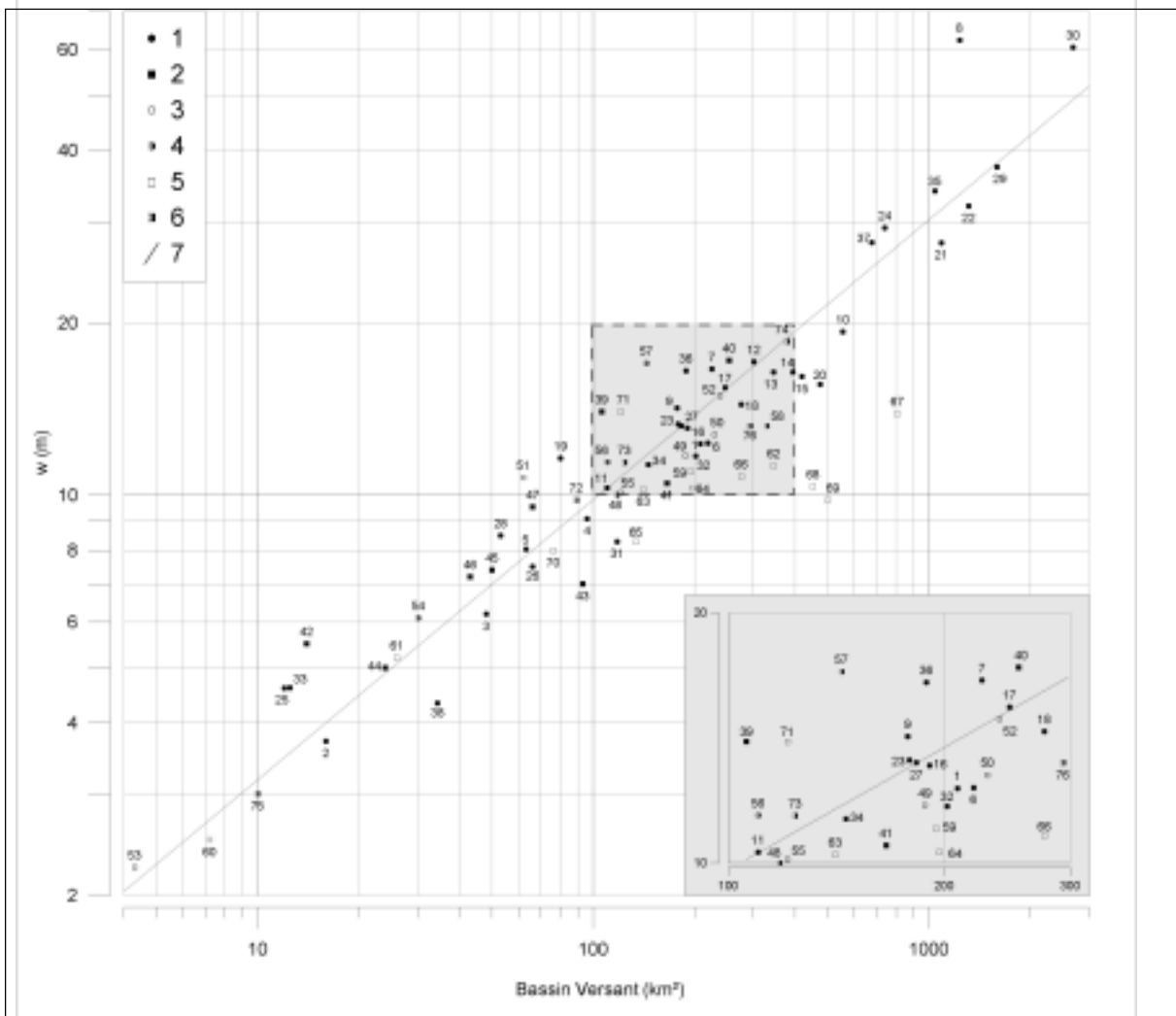


Figure 3. Relation entre la largeur du lit mineur et la taille du bassin hydrographique

(1) rivières à charge de fond caillouteuse sur substrat imperméable (Ardenne); (2) rivières sur substrat imperméable avec charge de fond peu importante (Fagne-Famenne) ; (3) rivières à charge de fond caillouteuse sur substrat perméable (Condroz) ; (4) rivières à charge de fond caillouteuse sur substrat partiellement imperméable (Entre-Vesdre-et-Meuse) ; (5) rivières à charge limono-sableuse sur substrat perméable (Hesbaye et Hainaut) ; (6) rivières à charge de fond sableuse sur substrat partiellement imperméable (Lorraine). (7) Relation établie à partir des rivières à charge caillouteuse sur substrat imperméable (Ardenne, stations 1 à 38) : $w = 1,032 A^{0,489}$

en évidence à Stadtbredimus (bassin versant = 11 700 km²) par Bégué (2002).

À propos de la valeur du débit à plein bord du Geer à la station de Kanne (69), précisons qu'il s'agit du débit enregistré à cette station lorsqu'il y avait débordement un peu plus en amont (commune de Bassenge), dans la zone non encore normalisée à l'époque (Mabille & Petit, 1987). À l'heure actuelle, suite à ces travaux de normalisation, des débordements généralisés se produisent pour un débit voisin de 12 m²/s.

B. Relation entre la largeur du lit fluvial et la taille du bassin hydrographique

Les relations proposées dans la littérature lient généra-

lement la largeur (w) et le débit à plein bord (Q_b), pris comme descripteur de la taille du bassin versant. Elles se présentent sous la forme suivante :

$$w = a Q_b^b$$

a variant de 2,8 à 3,7 et b de 0,44 à 0,56 selon les contextes géographiques (Emett, 1975 ; Charlton *et al.*, 1978 ; Ferguson, 1981 ; Hey, 1986). Une relation établie à partir d'une vingtaine de rivières de Haute Belgique a donné $a = 3,41$ et $b = 0,45$ (Petit, 1995).

De façon générale, on note une augmentation de la largeur avec la taille du bassin versant ou avec le débit, mais la largeur du lit mineur dépend également d'autres facteurs. Si les berges sont composées de matériau argileux, il y a contraction du lit. D'autre part, si la charge de fond est grossière, on observe généralement une aug-

mentation de la largeur. La largeur du lit mineur est également fonction du type de végétation qui colonise les berges (Bergeron & Roy, 1985 ; Huang & Nanson, 1997 ; Millar, 2000 ; Piégay *et al.*, 2003).

Dans la perspective de travailler à partir d'un Modèle Numérique de Terrain, nous avons préféré établir directement une relation entre la largeur et la taille du bassin versant (Fig. 3).

La relation, établie à nouveau sur base des seules rivières ardennaises, s'exprime de la façon suivante :

$$w = 1,032 A^{0,489} (R^2 = 0,924)$$

Globalement pour les rivières ardennaises, on note quelques anomalies. Une première concerne la Semois ardennaise (8) ; elle s'explique par le fait que cette rivière, décrivant de larges méandres encaissés, voit fréquemment affleurer la roche en place dans le fond alluvial, ce qui limite son incision et tend à développer, par ajustement, une plus grande largeur du lit fluvial. Ceci ressort particulièrement bien du rapport largeur-profondeur

(w/d) qui atteint 30 dans la Semois alors qu'il est voisin de 15 dans des rivières telles que l'Ourthe ou la Lesse.

La largeur assez importante de la Wamme (19) résulte plus que probablement de la taille de sa charge de fond mais surtout de son abondance : le charriage spécifique s'y monte en effet à 2,2 t/km²/an, alors qu'il est généralement inférieur à 1 t/km²/an dans la plupart des rivières ardennaises (Petit *et al.*, 1996).

En ce qui concerne les rivières non ardennaises, on peut noter que toutes les rivières de Hesbaye ont systématiquement des largeurs moindres, ce qui résulte de la nature de leurs berges.

D'autres considérations pourraient être envisagées, mais, comme cela a été montré ci-dessus, il semble que la morphologie des lits, envisagée dans un contexte régional, doit être étudiée en tenant compte du rapport largeur-profondeur d'une part, de la taille de la charge de

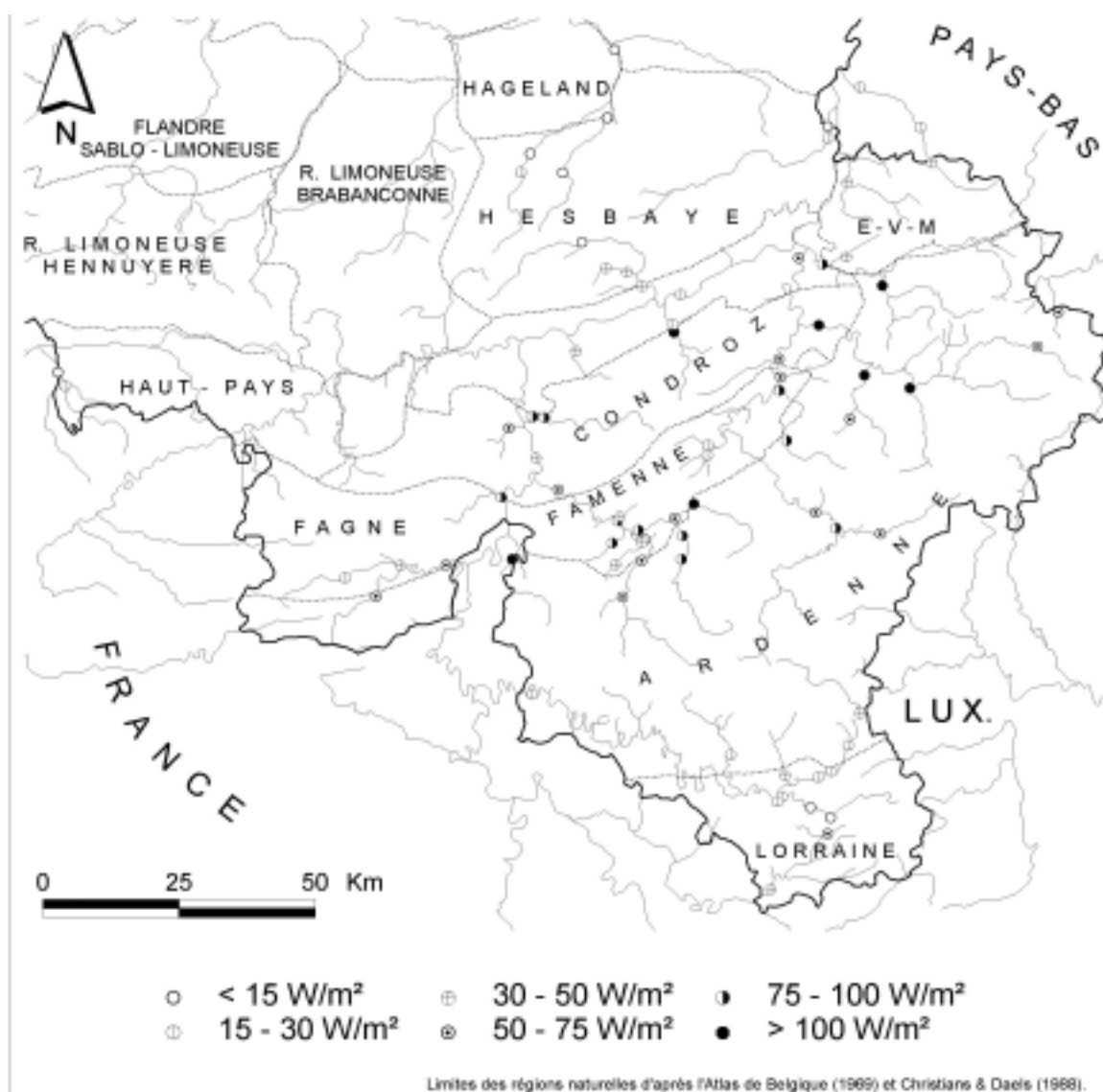


Figure 4. Valeurs des puissances spécifiques calculées au débit à plein bord

fond d'autre part. Ceci a d'ailleurs déjà fait l'objet d'une première esquisse (Petit & Pauquet, 1997) et des relevés systématiques sont actuellement en cours afin d'arriver à proposer une synthèse plus vaste.

C. Valeurs des puissances spécifiques

Avant toute chose, examinons l'évolution des deux paramètres qui conditionnent l'importance de la puissance en fonction de la taille du bassin hydrographique : dans les têtes de bassin, les pentes longitudinales sont souvent importantes mais les débits faibles, ce qui entraîne finalement des puissances modérées. À un accroissement de la taille du bassin, correspondent généralement une diminution de la pente longitudinale et une augmentation du débit, ce qui donne également des puissances modérées. L'évolution divergente des deux paramètres (pente et débit) se traduit par un maximum de puissance lorsque les rivières ont une taille intermédiaire, avec un bassin hydrographique de l'ordre de 100 à 500 km² (Ferguson, 1981 ; Graf, 1988). Ce schéma s'entend bien sûr dans des régions homogènes quant à l'énergie de leur relief, soumises à de mêmes conditions hydroclimatiques génératrices des débits. Nous verrons qu'il faut nuancer ce schéma dans un contexte régional aussi diversifié que celui du massif ardennais. Par ailleurs, rappelons que dans les thalwegs élémentaires situés en tête de bassin, la prolifération d'embâcles végétaux entraîne des pertes d'énergie qui réduisent la puissance disponible pour le transport de la charge de fond (Assani & Petit, 1995).

Les puissances spécifiques au niveau du plein bord ont été reportées sur une carte de synthèse (Fig. 4). Quelques précisions sont à apporter quant au choix des classes de puissance. En effet, Brookes (1988) a montré que les rivières dont la puissance spécifique ne dépasse pas 15 W/m² se caractérisent généralement par des chenaux inactifs et des méandres libres relativement figés. Les méandres actifs non confinés nécessitent des puissances au moins supérieures à 30 W/m² (Ferguson, 1981), ce qui rejoint assez bien les conclusions de Brookes (1988) qui observait que les rivières dont la puissance est inférieure à 35 W/m², sont incapables d'un auto-ajustement en réponse à des aménagements ou à des contraintes extérieures. Par contre, les rivières où la puissance dépasse 100 W/m² ont une dynamique de modification du tracé fort active, avec des processus pouvant même aboutir à la multiplication des chenaux et à la formation du tressage, ceci dépendant aussi de la taille du matériau qui constitue le fond du lit (Richards, 1982). Par ailleurs, dans ces rivières à forte énergie, le cycle apparition/disparition des méandres se réduit à une vingtaine d'années (Bravard, 1991). Enfin, lorsque la puissance spécifique atteint 200 W/m², des rivières à charge caillouteuse grossière et à fort gradient peuvent alors s'organiser en *step-pool system* (Gintz *et al.*, 1996), c'est-

à-dire une disposition en marches-cuvettes régulièrement espacées : les marches sont constituées de blocs alignés perpendiculairement au thalweg, tandis que des matériaux plus fins, mais toujours caillouteux, tapissent le fond des mouilles. Rappelons que toutes les valeurs de puissance spécifique proposées ci-dessus s'entendent pour le débit à plein bord et que ce ne sont pas les valeurs de puissance qui contribuent au processus ou à la morphogenèse qui sont avancées. C'est ainsi, par exemple, que la mise en place des *step-pool systems* nécessite des puissances beaucoup plus importantes, atteintes lors de crues quinquennales (Chin, 2002), voire plus que décennales (Montgomery & Buffington, 1997). Notons enfin que, dans le continuum des styles fluviaux, il s'organise, entre les lits à méandres et les *step-pool systems*, des lits subrectilignes, sans méandration, mais avec une ébauche d'alternance seuils-mouilles, et où la charge de fond grossière ne s'organise pas en alignement de blocs disposés transversalement au lit ; ceci pourrait correspondre au style « *active low sinuosity* » défini par Ferguson (1981). Bien que des valeurs précises de la littérature soient peu abondantes à ce sujet, il semble que ce style fluvial se situe dans des fourchettes de puissance comprises entre 100 et 200 W/m².

C'est dans cette optique que nous avons retenu les différentes classes de puissance spécifique sur la carte de synthèse, les valeurs précises étant reprises dans le tableau 1.

On note tout d'abord un contraste flagrant entre le sud et le nord de l'Ardenne. Les rivières du sud de l'Ardenne (Rulles, Vierre et Semois ; 2-8) ont des puissances relativement faibles (inférieures à 30 W/m²), ce qui résulte de pentes peu marquées liées à un héritage géomorphologique résultant de la mise en place du réseau hydrographique de la Semois (Pissart, 1961). En comparaison, la Sûre (1) qui appartient au bassin de la Moselle, montre des puissances plus importantes. Dans le nord de l'Ardenne, les puissances sont systématiquement plus importantes (toujours supérieures à 50 W/m²) mais à des degrés divers. Dans l'Ardenne du nord-est, on note en effet des valeurs proches voire supérieures à 100 W/m² (cf. Aisne (26-27), Lienne (34), Salm (32), Hoëgne (36), Amblève (35)). Les rivières d'Ardenne centrale montrent des valeurs légèrement plus faibles, aux environs de 70 W/m² pour la Lesse ardennaise et ses affluents mais avec un gradient est-ouest : la Wamme (19) montre plus de 100 W/m², suivie par la Lhomme (16-17) et enfin par la Lesse elle-même (12-13), calqué sur l'énergie du relief. L'Ourthe, dans sa partie ardennaise (23), montre des puissances du même ordre de grandeur que la Lesse, voire légèrement plus faibles.

L'énergie du relief et la proximité de la Meuse qui fait office de niveau de base justifient également les puis-

sances élevées de certaines rivières. C'est le cas de rivières du Condroz telles que le Bocq (49-50) et le Hoyoux (52) (plus de 75 W/m^2). C'est également le cas de la Houille (11) qui, sur une courte distance, descend de la Croix Scaille et que l'on peut d'ailleurs opposer au Viroin (10) qui a des puissances plus faibles étant donné que son tracé est plus long et que sa dénivelée est moindre.

Les rivières de Fagne-Famenne (39 à 47) ont systématiquement des puissances inférieures à 50 W/m^2 et souvent même voisines de 30 W/m^2 , voire moins. Les rivières de Hesbaye (59 à 69) montrent des puissances plus faibles encore, pour la plupart inférieures à 15 W/m^2 , à l'exception de la Burdinale (60-61) et du cours inférieur de la Mehaigne (62) là où elles incisent le Paléozoïque. Notons enfin que les rivières de l'Entre-Vesdre-et-Meuse (54 à 58) présentent des valeurs oscillant aux environs de 40 W/m^2 .

En Lorraine, la Rouge Eau (75), rivière qui entaille le revers de la première cuesta, montre une puissance importante (supérieure à 50 W/m^2) vis-à-vis des rivières à tracé subséquent telles que la Semois (72 à 74) et, dans une moindre mesure, le Ton (76). Des relevés supplémentaires sont toutefois nécessaires afin d'arriver à une généralisation.

D. Puissances spécifiques et dynamique des rivières

Certains indices de la dynamique des rivières étudiées ci-dessus peuvent être mis en relation avec les valeurs de puissance proposées. Ces observations portent d'une part sur l'évolution de la méandration et le style fluvial, d'autre part sur la compétence des rivières appréhendées par des campagnes de marquage de charge de fond et par l'analyse des macrosories. Des éléments supplémentaires seront fournis par la résistance de protections de berges dans certaines des rivières étudiées.

Les rivières de Hesbaye, telles que le Geer, qui développent des puissances spécifiques faibles (inférieures à 10 W/m^2) montrent une grande stabilité de leur lit puisque le tracé apparaissant sur les cartes les plus anciennes qui remontent au XVIII^e siècle, est très proche du tracé actuel de la rivière, sans changement notable au niveau des méandres, si ce n'est un léger accroissement de la sinuosité. Toutefois, on remarque que suite à l'édification d'embâcles latéraux agissant tels des déflecteurs, cette rivière a réagi récemment en constituant une méandration secondaire (Petit, 1975). En d'autres termes, un certain ajustement peut donc se réaliser, malgré des puissances inférieures à 10 W/m^2 .

Dans le cas de rivières telles que l'Ourthe en Famenne, il ressort de la comparaison des cartes anciennes (Juvigné, 1964), que le temps de création des méandres

atteint près d'une centaine d'années et que le temps nécessaire à leur recouplement complet est du même ordre de grandeur, ce qui nous donnerait un cycle apparition/disparition des méandres très largement supérieur au siècle, alors que les puissances y dépassent 50 W/m^2 . Toujours par comparaison de cartes anciennes pour lesquelles un géoréférencement précis a été effectué, Snijders (2004) constate des modifications de tracé de cette même rivière dans le Condroz qui atteignent 60 m (période 1850-1980). Toutefois, il semble que ces valeurs doivent être nuancées lorsque l'on utilise la technique basée sur la présence de microsories dans les alluvions (Henrottay, 1973 ; Houbrechts & Petit, 2003). Dans ce cas, la mobilité latérale atteindrait au maximum 50 m en 500 ans (Snijders, 2004). Par ailleurs, comme il ressort des travaux de Targé (1970), on remarque que, d'un point de vue morphologique, l'Ourthe tend à évoluer localement vers une ébauche de tressage, par édification de bancs médians avec déversements latéraux, ceci pour des puissances de l'ordre de 70 W/m^2 . Ceci se marque également pour la Lesse en Famenne (puissance de l'ordre de 70 W/m^2). De même, des rivières comme la Lesse et la Lhomme en Famenne font preuve d'une activité marquée puisque l'on observe des déplacements de méandres sur des distances de plusieurs dizaines de mètres en une vingtaine d'années (Franchimont, 1993).

Les rivières de l'Entre-Vesdre-et-Meuse, malgré des puissances comprises entre 25 et 50 W/m^2 , font preuve d'une dynamique fort active puisque des érosions latérales atteignant localement 0,5 m/an ont été observées sur la Berwinne (Parotte, 1991 ; Hallot *et al.*, 2003) ainsi que sur la Gueule (Gilliquet, 1989 ; Stam, 2002) pour des puissances qui localement sont inférieures à 30 W/m^2 . Notons également que ces rivières peuvent faire preuve d'auto-ajustement. Ainsi dans la Berwinne, trois déflecteurs ont été installés afin de limiter le recul d'une berge dans la concavité d'un méandre, tout en préservant la verticalité de cette berge. Suite à cette implantation, un ajustement très rapide de la largeur de la Berwinne a été observé avec un recul maximum de la berge opposée atteignant 0,8 m en un mois ; le recul total après trois mois, temps qu'il a fallu pour que l'ajustement se stabilise, a atteint 2,5 m au maximum (Hallot *et al.*, 2003).

Les rivières du sud de l'Ardenne, qui développent des puissances peu importantes, montrent une évolution peu rapide du cycle de la méandration. Une étude détaillée portant sur douze méandres de la Rulles en forêt d'Anlier (15 W/m^2), montre que tous les méandres actuels étaient déjà présents en 1957 (date des premières photographies aériennes) et que la plupart d'entre eux n'ont pas évolué de façon significative (Petit, 1992). Par ailleurs, les recouplements de méandres prennent un temps considérable, même lorsque des chenaux s'individualisent au travers du pédoncule des méandres, ce qui nécessite une

série de conditions préparatoires (Petit, 1984). L'érosion latérale suivie dans certains de ces méandres a été, au maximum, de 1,5 m en trente ans. La compétence effective de cette rivière est relativement limitée puisque les éléments les plus grossiers susceptibles de se déplacer sur de grandes distances n'atteignent que 15 mm (Petit, 1987).

À cet égard, rappelons que les scories métallurgiques rejetées dans les rivières depuis le XIV^e siècle peuvent être utilisées comme indicateur fiable de cette compétence effective des rivières (Sluse, 1996 ; Houbrechts, 2000 ; Vanderheyden, 2003 ; Mols, 2004). Ainsi, en considérant la taille des scories transportées sur de longues distances (c'est-à-dire en aval des secteurs de tri), Houbrechts et Petit (2001) ont montré qu'il existait une très bonne relation entre la taille moyenne des dix plus grosses scories et la puissance spécifique calculée pour le débit à plein bord. Par exemple, la taille des scories mobilisées est de 14 mm dans la Rulles en aval du secteur des forges (27 W/m²), de 40 mm dans l'Ourthe (54 W/m²), de 55 mm dans l'Aisne (92 W/m²) et de 60 mm dans la Hoëgne (140 W/m²). Ces valeurs ont été confirmées par ailleurs grâce à de nombreuses campagnes de marquage de la charge de fond qui ont permis de connaître la taille des éléments mobilisés ainsi que la distance de charriage (Petit *et al.*, 2005).

La puissance beaucoup plus importante développée par les rivières du nord de l'Ardenne se marque également sur leur style fluvial et leur dynamique. En effet, dans des rivières comme l'Aisne, la Hoëgne, la Salm et le cours inférieur de la Lienne, l'organisation du lit mineur ne se fait pas en train régulier de méandres libres avec une nette association de seuils et de mouilles. Le lit est sinueux voire subrectiligne, avec une dominance de fond plat, même si on peut observer des ébauches de seuils et mouilles mais sans organisation systématique. Le lit est tapissé d'une charge de fond grossière, sans toutefois voir une organisation systématique des plus gros éléments en *step-pool-system*. Rappelons à cet égard qu'il s'agit du style fluvial au droit des stations étudiées et qu'il n'est pas exclu que des *step-pool-system* s'individualisent dans les secteurs amont de ces rivières, ce qui est d'ailleurs observé dans la Hoëgne notamment et dans d'autres rivières descendant des Hautes-Fagnes (la Helle, par exemple) pour lesquelles nous ne disposons pas encore de données suffisantes.

Les systèmes à méandres libres bien organisés semblent être le fait de rivières à puissance plus faible : pour rappel, on les retrouve dans des rivières ardennaises où la puissance spécifique est de l'ordre de 60 W/m² ; il s'agit notamment de la Schwalm (38) (Molitor, 1991), de la Chavanne (33) (Mayerès, 2005) et du cours supérieur de la Lienne (Masson, 1971) où, dans ce dernier cas, nous ne disposons malheureusement

pas de valeurs de puissance car aucune station limnographique n'y est implantée.

CONCLUSIONS

Globalement, force est de constater que les puissances spécifiques des rivières du massif ardennais et de ses « avant-pays » se calquent prioritairement sur les grands ensembles morpho-structuraux qui conditionnent l'énergie du relief et donc les gradients longitudinaux des rivières. En second lieu, vient la composante hydroclimatique qui, par le biais des précipitations et des lames d'eau disponibles pour l'écoulement, conditionne l'importance des débits. Des nuances sont évidemment à apporter en fonction de la lithologie des bassins hydrographiques.

Au niveau régional, il ressort un contraste flagrant entre les rivières du sud et du nord de l'Ardenne. Par ailleurs, au nord même de l'Ardenne, il se dessine un gradient est-ouest de décroissance des puissances, partant de l'Ardenne du nord-est, via le rebord septentrional de l'Ardenne centrale, aboutissant à l'Entre-Sambre-et-Meuse. En Ardenne centrale même, au niveau de la surface d'érosion principale, il est fort probable que, étant donné la moindre incision dans le relief, les puissances soient moins élevées. Malheureusement, nous manquons de données, à l'heure actuelle, pour étayer cette hypothèse. La proximité d'un niveau de base peu élevé (la Meuse) conditionne des puissances élevées dans le Condroz. En Lorraine, il est fort probable que l'on puisse individualiser des différenciations locales en fonction de la disposition du réseau hydrographique (réseau conséquent *versus* réseau subséquent).

En ce qui concerne l'adéquation entre puissances et style fluvial d'une part, entre puissances et dynamique évolutive des lits d'autre part, le constat est plutôt mitigé. On observe un certain nombre de points qui se vérifient par rapport à la littérature mais aussi un certain nombre de divergences.

Les points qui cadrent avec les valeurs proposées par la littérature sont les suivants :

- en Hesbaye où les rivières développent de faibles puissances, on observe peu d'évolution du tracé en plusieurs siècles ;
- dans le sud de l'Ardenne (puissances inférieures à 30 W/m²), les méandres sont très peu actifs : vu le temps nécessaire aux recoupements de méandres, le cycle de la méandration est très largement supérieur au siècle ;
- dans l'Entre-Vesdre-et-Meuse (puissance de l'ordre de 30 à 40 W/m²), les méandres libres sont actifs et on observe des possibilités de réajustement.

Les points qui s'écartent des « valeurs seuils » proposées dans la littérature sont les suivants :

- le Geer (Hesbaye), malgré une puissance inférieure à

15 W/m², peut se réajuster et créer une méandration secondaire face à des contraintes extérieures ;
 - en Famenne, malgré des puissances relativement élevées (supérieures à 50 à 70 W/m²), le cycle de la méandration est très largement supérieur au siècle ;
 - toujours en Famenne, on observe une tendance au tressage alors que les puissances sont nettement inférieures à la valeur seuil proposée par la littérature (pour rappel puissance supérieure à 100 W/m²).

Notons enfin qu'en Ardenne, lorsque l'on atteint un seuil voisin de 100 W/m², on passe d'un système à méandres libres actifs à un système à lit sinueux (voire subrectiligne), à fond plat, qui tend à se rapprocher du *step-pool system*.

REMERCIEMENTS

G. Houbrechts bénéficie d'une bourse du FRIA. E. Hallot et J. Mols mènent tous deux leur recherche dans le cadre du projet Interreg « Wege des Wassers » subsidié par le FEDER et la Région Wallonne (DCENN). Les auteurs remercient le professeur J.P. Bravard pour les remarques et suggestions apportées lors de la lecture critique de cet article. De nombreux documents ont été très aimablement mis à notre disposition par le DCENN (Direction des Cours d'Eau Non Navigables de la Région Wallonne) et par le MET-SETHY (Service d'Études hydrologiques du Ministère de l'Équipement et des Transports de la Région Wallonne).

NOTE

¹ Cette analyse est basée sur le dépouillement d'archives de presse, de documents des services d'interventions (SRI et Protection civile) et de l'abondante documentation constituée depuis plusieurs décennies par la Direction des Cours d'eau Non Navigables (DCENN) de la Région Wallonne.

BIBLIOGRAPHIE

ASSANIA A.A., PETIT F., 1995. Log-jams effect on bedload mobility from experiments conducted in a small gravel-bed forest ditch, *Catena*, 25, pp. 117-126.
 ASSANIA A.A., PETIT F. & MABILLE G., 1999. Analyse des débits de la Warche aux barrages de Butgenbach et de Robertville. *Bull. Soc. Géog. Liège*, 36, pp. 17-30.
 BAGNOLD R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 422-1.
 BAGNOLD, R.A., 1977. Bedload transport by natural rivers. *Water Resources Research*, 13 (2), pp. 303-312.
 BEGUÉ V., 2002. *Les inondations dans le bassin de la Sûre et de la Moselle luxembourgeoise. Bilans hydrologiques de l'Attert et de deux de ses affluents.*

Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 87 p.
 BERGERON N. & ROYA., 1985. Le rôle de la végétation sur la morphologie d'un petit cours d'eau. *Géographie physique et Quaternaire*, 39(1), pp. 323-326.
 BERNOT V., CALLAND V., BRAVARD J.P. & FOUSSADIER, R. 1996. La sectorisation longitudinale du Vidourle (Gard-Hérault) : une méthode appliquée à la gestion environnementale d'un espace fluviale méditerranéen. *Revue de Géographie de Lyon*, 74(4), pp. 323-339.
 BRAVARD J.P., 1991. La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux : Quels enseignements applicables à l'aménagement des rivières ? *La Houille Blanche*, 7-8, pp. 515-521.
 BRAVARD J.P. & PETIT F., 1997. *Les cours d'eau: dynamique du système fluvial*. A. Colin, Paris, 222 p.
 BROOKES A., 1988. *Channelized rivers, perspectives for environmental management*. Wiley, New York, 326 p.
 CHARLTON F.G., BROWN P.N. & BENSON R.W., 1978. *The hydraulic geometry of some gravel rivers in Britain*. Hydraulic Research Station Report IT 180, 48 p.
 CHIN A. 2002. The periodic nature of step-pool mountain streams. *American Journal of Science*, 302, pp. 144-167.
 CHRISTIANS C. & DAELS L., 1988. Belgium : a geographical introduction to its regional diversity and its human richness. *Bull. Soc. Géog. Liège*, 24, 180 p.
 DAVE C., 1975. *Étude de la dynamique fluviale d'un petit ruisseau de type torrentiel*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 148 p.
 DEMOULIN A., 1998. Testing the tectonic significance of some parameters of longitudinal river profiles : the case of the Ardenne (Belgium, NW Europe). *Geomorphology*, 24, pp. 189-208.
 DEROANNE C., 1995. *Dynamique fluviale de la Hoëgne. Évaluation longitudinale des caractéristiques sédimentologiques du lit et des paramètres de mobilisation de la charge de fond*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 155 p.
 EMMETT W.W., 1975. The channels and waters of the Upper Salmon River Area Idaho. *US Geol. Survey Prof. Paper*, 870A, 116 p.
 FERGUSON R.I., 1981. *Channel form and channel changes* ; In *British Rivers*, Lewin J. (Ed), Allen, London, pp. 91- 125.
 FRANCHIMONT C., 1993. *Dynamique fluviale de la Lesse : fréquence des inondations, morphométrie des méandres et sédimentologie du lit*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 121 p.
 GILLIQUET M., 1989. *Étude du profil d'équilibre du cours d'eau et de son influence sur son évolution*, ministère de la Région Wallonne, DGRNE, SCENN, 61 p.
 GINTZ D., HASSAN M.A. & SCHMIDT K.H., 1996.

- Frequency and magnitude of bedload transport in a mountain river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, pp. 433-455.
- GOB F., HOUBRECHTS G., HIVER J.M. & PETIT F., 2005. River dredging, channel dynamics and bedload transport in an incised meandering river (the River Semois, Belgium). *River Research and Applications* (sous presse).
- GRAF W.L. 1988. *Fluvial processes in Dryland Rivers*. Springer-Verlag, 346 p.
- HALLOTE., 2004. *Recherches méthodologiques en vue d'une typologie de cours d'eau*. Mém. DEA Sciences, Univ. Liège, 61 p.
- HALLOT E., PETIT F., VERNIERS G. & LAMBOT F., 2003. *Utilisation des techniques végétales pour la stabilisation des berges : suivi de chantiers réalisés dans différents types de rivières wallonnes*. Actes du colloque «Évaluer la capacité du milieu », Journées des géographes belges, SOBEG-BEVAS, Liège, pp. 173-178.
- HASSAN M.A., CHURCH M. & ASHWORTH P.J., 1992. Virtual rate and mean distance of travel of individual clasts in gravel bed channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, pp. 617-627.
- HENROTTAY J., 1973. La sédimentation de quelques rivières belges au cours de ces derniers siècles. *Bull. Soc. Géog. Liège*, 9, pp. 101-115.
- HEY R., 1986. River mechanics. *Journal of the Institution of water engineering and Scientists*, 40(2), pp. 139-145.
- HOMBROUCKX N., 2002. *Analyse hydrologique du bassin de la Gette : Identification et récurrence du débit à pleins bords, zones inondables et localisation de l'habitat, transport en solution et en suspension*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 267 p.
- HOUBRECHTS G., 2000. *Utilisation des macrosories comme indicateur du transport de la charge de fond des rivières de la « Terre de Durbuy », Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 137 p.*
- HOUBRECHTS G. & PETIT F., 2001. La métallurgie ancienne en « Terre de Durbuy » : utilisation des macrosories en dynamique fluviale. *Bull. Soc. Géog. Liège*, 40, pp. 67-79.
- HOUBRECHTS G. & PETIT F., 2003. Utilisation des scories métallurgiques en dynamique fluviale : détermination de la compétence effective des rivières et estimation des vitesses de progression de leur charge de fond. *Géomorphologie*, 2003/1, pp. 3-12.
- HUANG H.Q. & NANSON G.C., 1997. Vegetation and channel variation : a case study of four small streams in southeaster Australia. *Geomorphology*, 18, pp. 237-249.
- JUVIGNE E., 1964. Étude géomorphologique dans la région de Noisieux. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 87, pp. 263-270.
- LAMALLE C., PETIT F., KOCH G., HURTGEN C. & PISSART A., 1989. Les transports en suspension et en solution dans la Burdinale, affluent principal de la Mehaigne. *Bull. Soc. Géog. Liège*, 25, pp. 39-52.
- LENNERTZ L., 1976. *Étude de dynamique fluviale d'une rivière de l'Entre Vesdre et Meuse, La Gueule*, Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 183 p.
- LOUETTE F., 1995. *Évaluation du débit à pleins bords et de sa récurrence dans plusieurs rivières de Moyenne et Haute Belgique. Relations avec les paramètres morphométriques, sédimentologiques et dynamiques*, Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 102 p.
- MABILLE G. & PETIT F., 1987. *Influence des aménagements du cours d'une rivière de Moyenne Belgique et de son bassin hydrographique sur le comportement hydrologique de la rivière. Crues et inondations*, Humbert J. et al. (Eds), Strasbourg, pp. 279-293.
- MASSON M.H., 1971. *Contribution à l'étude de la dynamique fluviale de la Lienne*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 95 p.
- MAYERES N., 2005. *Impacts des aménagements de l'autoroute E25 sur la morphologie de la Chavanne, affluent de la Lienne*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège,
- MERCENIER J., 1973. *Dynamique fluviale dans un petit bassin du rebord méridional du plateau des Tailles*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 148 p.
- MILLAR R.G., 2000. Influence of bank vegetation on alluvial patterns. *Water Resources Research*, 36 (4), pp. 1 109-1 118.
- MOLITOR N., 1991. *Méandres, régime hydrologique et végétation de la rivière Schwalm (plateau d'Elsborn, Belgique)*, Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 178 p.
- MOLS J., 2004. *Dynamique fluviale en réponse aux changements d'affectation du sol des bassins versants de l'Euregio Meuse-Rhin*, Mém. DEA Sciences, Univ. Liège, 55 p.
- MONTES M.L., 1989. *Étude comparative du comportement hydrologique dans trois bassins versants*. Mem. Maîtrise Inter. Géol. Terr. Superficiels, Univ. Liège, 107 p.
- MONTGOMERY D.R. & BUFFINGTON J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5), pp. 596-611.
- PAROTTE V., 1991. Évolution géomorphologique actuelle d'une rivière en relation avec les modifications de son régime hydrologique. La Berwinne à Dalhem (Entre Vesdre et Meuse). Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 84 p.
- PAUQUETA. & PETIT F., 1993. Évolution et fréquence des inondations de l'Ourthe inférieure. *Bull. Soc. belge d'études géographiques*, 62 (2), pp. 361-375.
- PERPINIEN G., 1998. *Dynamique fluviale de la Mehaigne : morphométrie, transports en solution et suspension, mobilisation de la charge de fond*. Mém.

- Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 128 p.
- PETIT F., 1975. Zone de dépôts et points d'érosion dans les méandres et les sinuosités du Geer inférieur. *Bull. Soc. Géog. Liège*, 11, pp. 129-145.
- PETIT F., 1984. Les processus contrôlant l'évolution du tracé d'une rivière ardennaise. *Zeitschrift für Geomorphologie*. Suppl. Bd 49, pp. 95-109.
- PETIT, F., 1987. The relationship between shear stress and the shaping of the bed of a pebble-load river (la Rulles - Ardenne). *Catena*, 14 (5), pp. 453-468.
- PETIT F., 1992. *L'influence des plantations de résineux en fond de vallée sur l'évolution géomorphologique de rivières de Haute Belgique*. Colloque International Région Wallonne (Namur) : Impacts des travaux d'aménagement sur les cours d'eau : évaluation, méthodologie, aide à la gestion, pp. 341-352.
- PETIT F., 1995. *Régime hydrologique et dynamique fluviale des rivières ardennaises*. L'Ardenne : Essai de Géographie Physique. Livre en hommage au Professeur A. Pissart, DEMOULIN, A. (Ed.), pp. 194-223.
- PETIT F. & DAXHELET C., 1989. Détermination du débit à pleins bords et de sa récurrence dans différentes rivières de Moyenne et de Haute Belgique. *Bull. Soc. Géog. Liège*, 25, pp. 69-84.
- PETIT F., PAUQUET A. & PISSART A., 1996. Fréquence et importance du charriage dans des rivières à charge de fond graveleuse. *Géomorphologie*, 2 (2), pp. 3-12.
- PETIT F. & PAUQUET A., 1997. Bankfull discharge recurrence interval in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, pp. 685-693.
- PETIT F., GOB F., HOUBRECHTS G. & ASSANI A.A., 2005. Critical unit stream power in gravel-bed rivers. *Geomorphology*, 15 p. (sous presse).
- PETIT S., 2000. *Analyse quantitative du réseau hydrographique de la Meuse : exploitation d'un modèle numérique de terrain*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 78 p.
- PETTS G., 1977. *Channel response to flow regulation : the case of river Derwent, Derbyshire*. In *River channel changes*, Gregory K.J. (Ed.), Wiley, pp. 145-164.
- PIEGAY H., PEIRY J.L. & GAZELLE F., 2003. *Effets des ripisylves sur la dynamique du lit fluvial et de son aquifère*. In *Les forêts riveraines des cours d'eau : écologie, fonctions et gestion*. Piégay H, Pautou G. & Ruffinoni C. (Eds), Institut pour le développement forestier, pp. 94-122.
- PIRONET C., 1995. *Régime hydrologique, transports de sédiments et dynamique fluviale de la Magne*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 168 p.
- PISSART A., 1961. Les terrasses de la Meuse et de la Semois. La capture de la Meuse lorraine par la Meuse de Dinant. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 84, pp. 1-108.
- RICHARDS K., 1982. *Rivers, Forms and Process in Alluvial Channels*. Methuen, 358 p.
- SCENN, 2003. *Suivi écologique et géomorphologique des chantiers de techniques végétales*. Rapport final, Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale de l'Université de Liège et Groupe Interuniversitaire de Recherches en Ecologie Appliquée de Namur, Région Wallonne SCENN, 129 p.
- SCHMITT L., MAIRE G. & HUMBERT J., 2001. La puissance fluviale : définition, intérêt et limites pour une typologie hydro-géomorphologique des rivières. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., 45, pp. 201-224.
- SNIJDERS JP., 2004. *Délimitation des espaces de liberté des rivières à des échelles temporelles emboîtées. Application aux rivières ardennaises*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 146 p.
- SLUSE P., 1996. *Évolution de la Rulles, de la Semois et de la Mellier au cours des cinq derniers siècles grâce aux résidus métallurgiques de l'industrie du fer et par l'étude des cartes anciennes*, Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 206 p.
- SLUSE P & PETIT F., 1998. Évaluation de la vitesse de déplacement de la charge de fond caillouteuse dans de lit de rivières ardennaises au cours des trois derniers siècles, à partir de l'étude des scories métallurgiques. *Géographie physique et Quaternaire*, 52, pp. 373-380.
- STAM M. H., 2002. *Effect of land-use and precipitation changes on floodplain sedimentation in the nineteenth and twentieth centuries (Geul River, The Netherlands)*, Spec. Publs int. Ass. Sediment., 32, pp. 251-267.
- SUTTOM M., 1989. Étude historique d'hydrologie fluviale : l'exemple de la Meuse. *Bull. Soc. Géog. Liège*, 25, pp. 159-174.
- TARGE J.C., 1970. *La plaine alluviale de l'Ourthe*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 148 p.
- VAN DEN BERGHT J.H., 1995. Prediction of alluvial pattern of perennial streams. *Geomorphology*, 12, pp. 259-279.
- VANDERHEYDEN V., 2003. *Dynamique fluviale du Viroin. Contribution à la détermination des zones inondables du bassin, évolution des inondations, morphométrie et transport de la charge de fond*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. Liège, 114 p.

Adresse des auteurs :

François PETIT, Eric HALLOT, Geoffrey HOUBRECHTS
et Julien MOLS
Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale
Département de Géographie
Université de Liège
Allée du 6 août, 2 – Bât. B11, Sart Tilman
B-4000 Liège
Francois.Petit@ulg.ac.be