

Article

« Facteurs de variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums annuels des rivières Wallonnes (Belgique) »

Marie-Ève Vadnais, Ali A. Assani, Éric Hallot et François Petit

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 24, n° 3, 2011, p. 311-327.

Pour citer cet article, utiliser l'adresse suivante :

<http://id.erudit.org/iderudit/1006479ar>

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <http://www.erudit.org/apropos/utilisation.html>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : erudit@umontreal.ca

FACTEURS DE VARIABILITÉ SPATIALE DES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS MINIMUMS ANNUELS DES RIVIÈRES WALLONNES (BELGIQUE)

Factors of spatial variability of minimum flow characteristics in Wallonia rivers (Belgium)

MARIE-ÈVE VADNAIS¹*, ALI A. ASSANI¹, ÉRIC HALLOT², FRANÇOIS PETIT²

¹ Laboratoire d'hydro-climatologie et de géomorphologie fluviale, section de Géographie, Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, Boulevard des Forges, Trois-Rivières (Québec) G9A 5H7, Canada

² Département de Géographie Physique et Quaternaire, Université de Liège, Allée du 6 Août, B11, Sart Tilman, B4000 Liège, Belgique

Reçu le 23 juillet 2009, accepté le 20 janvier 2010

RÉSUMÉ

Cette note avait pour but de déterminer les facteurs environnementaux qui influencent la variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums annuels en Wallonie (Belgique) de 34 rivières, au moyen de deux méthodes complémentaires : la méthode de classification ascendante hiérarchique et la corrélation linéaire. Les deux méthodes ont été appliquées sur les données transformées par l'analyse en composantes principales. La classification ascendante hiérarchique (méthode de Ward) a mis en évidence l'influence de la lithologie et des activités anthropiques (pompage en eaux souterraines) sur les caractéristiques fondamentales des débits minimums annuels. Les rivières qui drainent un substrat relativement perméable sont caractérisées par des volumes d'écoulement très élevés, une faible variabilité interannuelle de ce volume, une forte variabilité interannuelle de la période d'occurrence et par de faibles valeurs de coefficients d'asymétrie. C'est le contraire pour les rivières qui coulent sur un substrat peu perméable ou imperméable. Les rivières, dont les débits sont artificiellement influencés, sont caractérisées par une variabilité de la magnitude et de la période d'occurrence

des débits minimums annuels plus importante que celle des rivières naturelles. L'analyse des corrélations entre les caractéristiques des débits et les facteurs environnementaux a mis en évidence une corrélation entre la forme de courbe de distribution des débits minimums annuels et plusieurs facteurs environnementaux (climat, utilisation des sols, localisation et caractéristiques physiographiques des bassins versants).

Mots clés : *Débits minimums annuels, caractéristiques des débits, variables hydrologiques, facteurs environnementaux, analyse en composantes principales, analyse ascendante hiérarchique, corrélation, Wallonie, Belgique.*

ABSTRACT

The goal of this study was to determine which environmental factors affect the spatial variability of annual minimum streamflow characteristics for 34 rivers in Wallonia (Belgium) using two complementary methods: the

*Auteur pour correspondance:

Téléphone: 819-376-5011

Télécopieur: 819-376-5179

Courriel : ali.assani@ugtr.ca

ascending hierarchical classification method and the linear correlation method. Both methods were applied after principal component analysis transformation was applied to the data. The ascending hierarchical classification method (Ward's method) identified the effect of lithology and anthropogenic activity (groundwater pumping) on the fundamental characteristics of annual minimum flows. Rivers that drain a relatively permeable substrate are characterized by very high flow volumes with low interannual variability, high interannual variability of the period of occurrence, and small asymmetry coefficients. Rivers that drain low permeability or impermeable substrates show the opposite patterns. Rivers in which flow is subjected to artificial influences are characterized by greater variability of the magnitude and of the period of occurrence of annual minimum flows than natural rivers. Analysis of linear correlations between streamflow characteristics and environmental factors highlighted a correlation between the form of the distribution curves of annual minimum flows and several environmental factors (climate, land use, location and physiographic characteristics of the watersheds).

Keywords: *Minimum annual flows, flow characteristics, hydrological variables, environmental factors, principal component analysis, correlation, Belgium.*

1. INTRODUCTION

Les études relatives aux débits minimums des rivières ont déjà fait l'objet de nombreux travaux en hydrologie. Ces travaux se sont intéressés à plusieurs aspects dont l'analyse des facteurs et processus de genèse des débits minimums, ainsi que l'élaboration des indices pour définir les caractéristiques des débits minimums annuels (DRACUP *et al.*, 1980; GURNELL, 1993; GUSTARD et IRVING, 1994; HOPKINSON et YOUNG, 1998; SMAKHTIN, 2001; YUNUS *et al.*, 2003). Par ailleurs, plusieurs autres études se sont intéressées à l'estimation, à la prédiction et à la modélisation des débits minimums annuels (ABI-ZEID et BOBÉE, 1999; DAVISON et VAN DER KAMP, 2008; HEJAZI et MOGLEN, 2006; ONOZ et BAYAZIT, 2002; OUARDA *et al.*, 2008; YUREKLI et OZTURK, 2003), afin de pouvoir définir les normes des débits réservés qui ont une importance capitale pour la protection de l'intégrité écologique des habitats aquatiques (ANNEAR et CONDOR, 1984; MUNSON et DELFINO, 2007; PETTS, 1995; SCATENA, 2004; VISMARA *et al.*, 2001). C'est dans ce contexte que de nombreuses études ont été réalisées pour analyser les effets d'activités anthropiques (barrages hydroélectriques en particulier) sur les débits minimums (ASSANI *et al.*, 2005; HU *et al.*, 2008; MAGILLAN et NISLOW, 2001, 2005; PYRON et NEUMANN, 2008; YANG *et al.*, 2008). Enfin, quelques études ont analysé la variabilité temporelle des débits

minimums en relation avec les indices climatiques (BONSAL et SHABBAR, 2008; KHALIQ *et al.*, 2008).

Cependant, il n'existe presque pas de travaux sur les facteurs qui influencent la variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums annuels (ASSANI *et al.*, 2006a). Dans son excellente synthèse sur les débits minimums, SMAKHTIN (2001) s'est limité seulement à la question relative à l'influence de la déforestation et du reboisement sur les débits minimums, en soulignant la controverse qui persiste sur cette influence, controverse rapportée par d'autres chercheurs (ANDRÉASSIAN, 2004; COSANDEY *et al.*, 2005; ROBINSON *et al.*, 2003). L'influence des autres facteurs n'a pas été abordée. Ainsi, nos connaissances sur les facteurs qui influencent la variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums d'un bassin versant à un autre restent encore, de manière générale, très fragmentaires. Pourtant, ces connaissances sont fort importantes pour l'élaboration des normes des débits réservés pour la protection des organismes aquatiques et semi-aquatiques, d'une part, et pour assurer l'intégrité écologique des écosystèmes fluviaux, d'autre part (ASSANI *et al.*, 2007; CAZAUBON et GIUDICELLI, 1999; GIBSON et MYERS, 1988; POFF *et al.*, 1997; REILY et JOHNSON, 1982; RICHTER *et al.*, 1996; ROOD *et al.*, 1995). L'objectif principal de notre travail est de déterminer les facteurs de la variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums en Wallonie (Belgique) au moyen de l'analyse ascendante hiérarchique et la méthode de corrélation. Ces facteurs peuvent être pris en compte dans un schéma d'élaboration des normes des débits réservés pour assurer l'intégrité écologique des rivières wallonnes.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Description des rivières sélectionnées et du site à l'étude

Cette étude est restreinte aux rivières situées en Wallonie (Belgique) (Tableau 1), puisque les données hydrologiques et environnementales étaient disponibles pour cette région. Du point de vue morphologique, la Belgique est formée de plusieurs unités naturelles traditionnellement regroupées en trois principales régions soit : la basse Belgique, la moyenne Belgique et la haute Belgique. Dans le cadre de cette recherche, nous avons uniquement étudié les caractéristiques des rivières de la moyenne et de la haute Belgique (Figure 1).

Les rivières sélectionnées en moyenne Belgique sont situées dans les régions limoneuses du Hainaut (Dendre, Haine, Senne, Sille et Trouille), du Brabant (Thyle) et de La Hesbaye (Mehaigne, Geer et Gette). Ces rivières coulent principalement sur un substrat limono-sableux. Quant aux rivières de la

Tableau 1. Rivières analysées.
Table 1. Rivers analyzed.

N°	Rivières	S (km ²)	Q (m ³ •s ⁻¹)	H (m)	RG
1	Amblève à Martinrive	1 068	19,5	110	A
2	Bocq à Yvoir	230	2,4	107,8	C
3	Brouffe à Mariembourg	80	0,96	155,9	FA
4	Dendre occidentale à ATH	229	1,59	28,9	LH
5	Dendre occidentale à Brugelette	110	0,93	42,4	LH
6	Dendre occidentale à Irchonwelz	126	0,79	30,9	LH
7	Eau blanche à Nismes	249	3,3	150,6	F
8	Eau noire à Couvin	176	3,1	191,1	A
9	Geer à Nekum	463	2,7	-	He
10	Grande Gette à St-Jean-Geest	135	1	55,4	He
11	Haine à Boussoit	163	1,5	44,8	S
12	Hermeton à Hastière	166	1,7	102,8	F
13	Hermeton à Romedenne	115	1,9	149,9	F
14	Houille à Felenne	113	1,95	189	A
15	Lessc à Daverdisse	302	5,44	211,8	A
16	Lesse à Gendron	1 286	17,52	103,4	A
17	Lesse à Ochamps	10	0,2	409,5	A
18	Lhomme à Jemelle	274	4,3	186,9	A
19	Mehaigne à Wanze	352	2,5	71,4	He
20	Molignée à Warnant	125	1,4	107,5	C
21	Ourthe à Hotton	940	15,3	174,3	FM
22	Ourthe à Nisramont	729	12,6	259,4	A
23	Ourthe orientale à Mabompré	317	5,3	292,3	A
24	Ourthe occidentale à Ortho	379	6,5	293,16	A
25	Ourthe à Tabreux	1607	22,9	110	A
26	Semois à Chantemelle	89	1,7	-	Lo
27	Semois à Membre	1 226	26,4	176	A
28	Senne à Steenkerque	146	5,5	52,9	LH
29	Sille à Isières	58	0,4	25,4	LH
30	Thyle à Suzeril	68	0,5	65,5	LB
31	Ton à Harnoncourt	293	5,1	193,1	Lo
32	Trouille à Hyon	224	1,5	31,6	S
33	Vierre à Straimont	182	4,2	346,6	A
34	Viroin à Treignes	542	7,8	119,7	A

S = superficie; Q = débit moyen annuel; H = altitude de la station de jaugeage; RG = région naturelle; A= Ardenne; C = Condroz; FA = Fagnes; He = Hesbaye; FM = Famenne; LB = Région limoneuse de brabançonne; LH = Région limoneuse hennuyère; LO = Lorraine; S = Ensemble de la Haine et de la Sambre.

haute Belgique, situées au sud du sillon Sambre et Meuse, elles drainent plusieurs sous-ensembles naturels : le Condroz, la Fagne-Famenne, l'Ardenne et la Lorraine belge. La lithologie y est diversifiée. Du nord au sud, nous pouvons distinguer le Condroz, relief de type appalachien, où alternent les tiges gréseuses et les chavées calcaires. Les rivières sélectionnées de cette région (Bocq et Molignée) sont généralement caractérisées par une charge de fond caillouteuse sur substrat perméable. La Famenne est considérée comme un espace de transition constitué de schiste entre l'Ardenne au sud et le Condroz au nord. La Fagne est le prolongement occidental de la Famenne et est constituée de la même lithologie. Les rivières de Fagne-Famenne sélectionnées (Brouffe, Eau Blanche et Hermeton) coulent sur un substrat imperméable avec une charge de fond caillouteuse peu importante. L'Ardenne, de son côté, est marquée par un relief développé en structure plissée ou faille composée de roches primaires (massif schisteux). Les

rivières ardennaises étudiées (Amblève, Eau noire, Houille, Lesse, Lhomme, Ourthe, Semois ardennaise, Vierre et Viroin) sont caractérisées par une charge de fond caillouteuse sur substrat imperméable. Finalement, la Lorraine est caractérisée par des dépôts du Trias et du Jurassique inférieur (marnes, grès plus ou moins friables et calcaires) en discordance sur la pénéplaine posthercynienne. Au Quaternaire, la résistance différentielle des roches a entraîné une érosion et la formation de trois cuestas. Les rivières de cette région, caractérisées par un débit de base dominant, sont définies par une charge de fond généralement sableuse, certaines sur substrat partiellement imperméable, d'autres sur substrat fort perméable. Attirons l'attention sur le fait que les débits des deux rivières sélectionnées sont artificiellement influencés. Il s'agit du Bocq et de la Semois à Chantemelle. Dans le premier cas, des prélevements d'eaux souterraines importants sont effectués dans le bassin versant. Cette eau est exportée hors du bassin versant et ceci peut

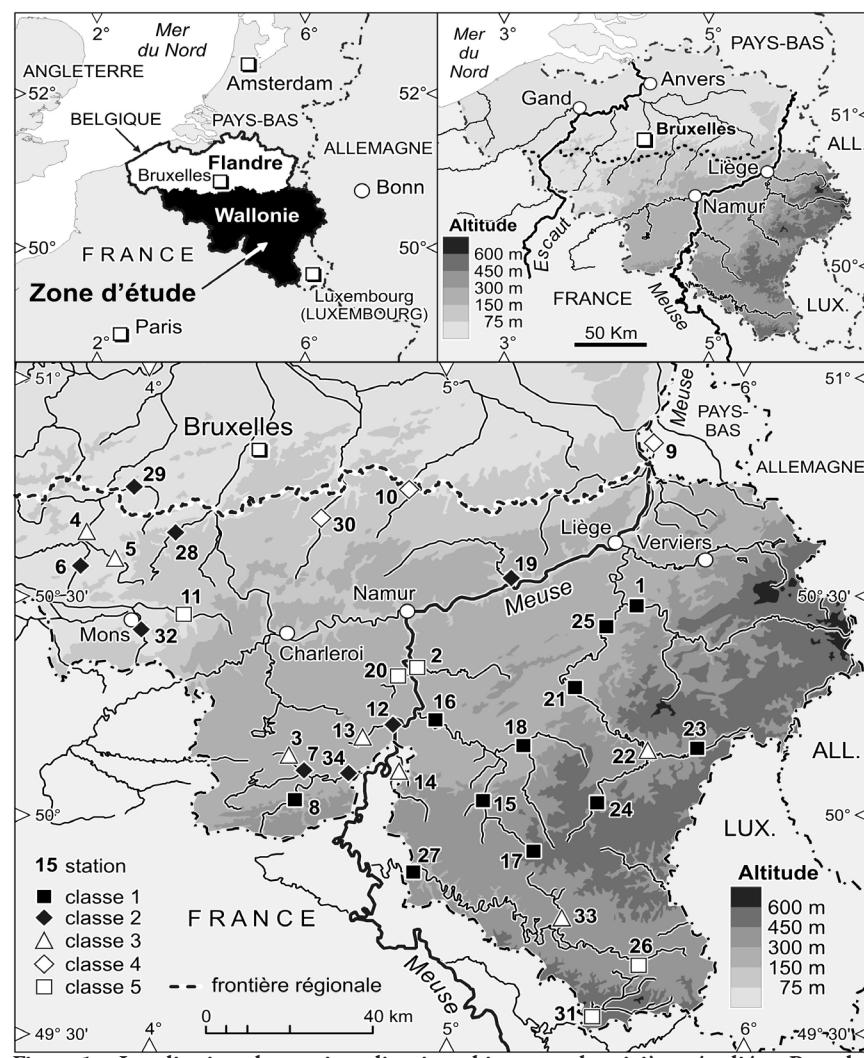


Figure 1. Localisation des stations limnigraphiques et des rivières étudiées. Pour les numéros de stations, voir tableau 1.

Location of stations and river gauges studied. For station numbers, see Table 1.

affecter de manière significative les caractéristiques des débits minimums annuels. Quant à la rivière Semois à la station de Chantemelle, un fort développement de végétation aquatique est observé durant la période estivale, ce qui est susceptible d'affecter la qualité des mesures des débits minimums annuels. Plutôt que d'écartez d'emblée ces deux rivières de notre étude, nous avons décidé de les conserver afin de pouvoir comparer leur comportement par rapport à celui des rivières naturelles. Ceci permettra ainsi de quantifier objectivement l'influence de ces deux facteurs (pompage et développement de la végétation) sur les caractéristiques des débits minimums annuels. Cette influence sera analysée seulement au moyen de la méthode de l'analyse ascendante hiérarchique.

Le climat de type tempéré océanique de la Wallonie est fortement influencé par la topographie du territoire. Les températures moyennes sont de 25 °C en été et d'environ 7,2 °C en hiver. Les régimes des précipitations sont diversifiés et les totaux pluviométriques, calculés annuellement, augmentent progressivement avec l'altitude (LAGIEWKA, 1981).

2.2. Sources de données

Les données des débits analysés proviennent de quatre sources différentes : AQUALIM (cours d'eau non navigables de Wallonie), SETHY (cours d'eau navigables de Wallonie), les Annuaires hydrologiques de Belgique ainsi que les données tirées de publications (PETIT *et al.*, 2005). Nous avons dépouillé les données journalières des débits de 34 stations limnigraphiques wallonnes (Figure 1 et Tableau 1) possédant au moins 20 ans de mesure continue de débits. La superficie des bassins versants étudiés varie entre 10 et 1 600 km². La valeur médiane est de 227 km². Les valeurs de variables hydrologiques analysées sont présentées au tableau 2.

Quant aux facteurs environnementaux, les données proviennent de plusieurs sources. Les données sur la superficie des bassins versants, au niveau des stations de mesure des débits, et les coordonnées géographiques ont été tirées des quatre sources précédentes. La longueur totale (km) de chaque cours d'eau ainsi que la pente moyenne de celui-ci

Tableau 2. Les valeurs des variables hydrologiques définies sur les séries annuelles des débits minimums annuels.
 Table 2 Values of the hydrological variables as defined for the annual series of minimum annual flows.

Stations	MO	ME	P10	P90	(P90-P10)/ME	MAX	MIN	CV
Amblyeve martinrive	2,877173	2,687266	1,863296	3,704120	0,685017	7,705993	1,554307	0,379143
Bocq yvoir	3,935452	3,936957	1,952174	6,100000	1,053562	7,243478	0,656522	0,417789
Brouffe mariembourg	0,278704	0,250000	0,125000	0,550000	0,750000	0,125000	0,635600	0,584228
Dendre occidentale ATH	1,210661	1,222707	0,340611	2,052402	1,400000	2,882096	0,174672	0,584228
Dendre occidentale brugelette	1,524985	1,365079	0,261905	2,711111	1,794186	3,222222	0,238095	0,580449
Dendre occidentale irchonwelz	1,175325	1,136364	0,700000	1,572277	0,768000	2,272727	0,545455	0,346505
Eau blanches nismes	1,125800	1,084337	0,679518	1,687550	0,929630	2,530120	0,321285	0,382472
Eau noire Couvain	1,319871	1,164773	0,594318	2,065909	1,263415	3,732955	0,295455	0,522885
Geer nekum	3,267020	3,239741	1,857451	4,688985	0,874000	5,615551	1,604968	0,326816
Grande gette st-jean-gest	3,895802	3,574074	2,278519	6,176296	1,090570	6,577778	2,162963	0,342668
Haine bousoit	4,252301	4,141104	2,453988	6,503067	0,977778	7,177914	1,963190	0,348817
Hermetton hastiere	1,366005	1,265060	0,879518	2,108434	0,971429	3,192771	0,602410	0,386006
Hermetton romedenne	1,406452	1,269565	0,460870	3,000000	2,000000	3,156522	0,008696	0,658530
Houille Fellenne	1,881695	1,681416	0,973451	3,238938	1,347368	4,336283	0,707965	0,479073
Lesse daverdisse	2,253725	2,019868	1,357616	3,774834	1,196721	6,622517	0,331126	0,525000
Lesse gendron	1,602705	1,354199	0,960031	2,568118	1,187482	4,844479	0,500778	0,518846
Lesse ochamps	2,880000	2,500000	1,560000	4,200000	1,056000	8,000000	0,200000	0,574929
Lomme jemelle	2,332345	2,226277	1,350365	3,872263	1,132787	5,364964	0,547445	0,424636
Mehaigne wanze	2,405704	2,572443	1,137784	3,430398	0,891220	4,215909	0,778409	0,381174
Molignée warnant	4,657797	4,640000	3,360000	5,920000	0,551724	7,040000	2,560000	0,237676
Ourthe hotton	1,523926	1,183462	0,762041	2,747335	1,677530	5,222446403	0,63597954	0,661485
Ourthe nisramont	1,465315	1,159122	0,561043	3,208505	2,284024	4,471879287	0,480109739	0,710464
Ourthe occidentale mabombe	1,865705	1,561514	1,126183	3,173502	1,311111	5,646687697	0,914826498	0,521323
Ourthe occidentale ortho	2,056900	1,635884	1,108179	2,802111	1,035484	7,46701847	1,055408971	0,663254
Ourthe tabreux	1,747060	1,456129	0,771002	3,126509	1,617650	6,16677038	0,400746733	0,618315
Semois chanteuelle	4,98085	4,376404	3,056180	7,668539	1,053915276	10,08988764	1,595505618	0,394928
Semois membre	2,189845	1,851550	1,054649	3,602773	1,376211454	6,982055465	0,44045677	0,600755
Senne steenkerque	1,992343	1,910959	1,439726	2,660274	0,638709677	3,602739726	1,150684932	0,272238596
Sille isières	0,581201	0,534483	0,241379	0,931034	1,290322581	1,103448276	0,086206897	0,487277952
Thyle suzur	4,339658	4,338235	2,382352941	6,058824	0,847457627	7,352941176	1,735294118	0,364021971
Ton harnoncourt	7,815369	7,880546	5,013651877	10,0887372	0,644001732	11,38566553	4,204778157	0,250775333
Trouille hyon	2,394481	0,848443	1,245535714	3,200892857	0,803669725	4,419642857	0,803571429	0,354332853
Vierre stramont	1,683551	1,401098901	0,494505495	3,214285714	1,941176471	6,593406593	0	0,807938281
Viroin treignes	1,426747781	1,282287823	0,827675277	2,190405904	1,062733813	3,13099631	0,380073801	0,412889401

Pour les noms de variables, voir le tableau 5.

Tableau 2. (Suite) Les valeurs des variables hydrologiques définies sur les séries annuelles des débits minimums annuels.
 Table 2 (Cont'd) Values of the hydrological variables as defined for the annual series of minimum annual flows.

Stations	(D _{MAX} - DM _{IN})/ME	ASYMTRIE B1	KURTOSIS B2	JJME	JMO	JCV	JP90	JP10
Amblyève martinrive	2,289199	2,559729	9,529238	240,450000	187,100000	0,200100	301,350000	179,550000
Bocq yvoir	1,673109	0,072924	-0,215177	277,150000	241,450000	0,280100	336,675000	205,275000
Brouffe mariembourg	2,500000	1,316312	0,969190	226,450000	227,440000	0,161800	270,140000	178,550000
Dendre occidentale ATH	2,214286	0,517802	-0,312358	240,450000	272,800000	0,219800	273,470000	198,300000
Dendre occidentale brugelette	2,186647	0,340900	-0,516859	244,800000	264,800000	0,161100	287,550000	191,300000
Dendre occidentale irchonwelz	1,520000	0,540419	0,457771	229,450000	203,100000	0,218700	263,800000	203,100000
Eau blanches nismes	2,037037	1,032863	2,365485	253,800000	293,15	0,148100	304,150000	217,450000
Eau noire Couvain	2,951220	1,390857	2,741732	253,800000	254,800000	0,146700	290,350000	210,700000
Geer nekum	1,237333	0,332200	-0,654699	218,450000	195,100000	0,316400	277,150000	134,400000
Grande gette st-jean-gest	1,235233	0,680149	-0,433715	244,620000	300,150000	0,319700	314,300000	152,300000
Haine bousoit	1,259259	0,329720	-0,535884	267,800000	267,800000	0,174800	298,450000	195,535000
Hermetton hastière	2,047619	1,466190	2,768088	241,450000	241,450000	0,166400	282,150000	191,160000
Hermetton romedenne	2,479452	0,646829	-0,651035	230,450000	220,450000	0,280200	296,150000	194,100000
Houille Felenne	2,157895	1,060255	0,480641	235,950000	235,450000	0,259600	270,400000	173,050000
Lesse daverdisse	3,114254	1,948393	5,273843	253,300000	279,150000	0,153900	299,050000	215,850000
Lesse gendron	3,207580	2,172830	5,821596	256,300000	242,450000	0,132400	296,150000	219,450000
Lesse ochamps	3,120000	1,621543	3,536073	242,450000	218,450000	0,157400	278,550000	180,350000
Lomme jemelle	2,163934	1,150415	1,903121	245,300000	257,800000	0,135200	293,850000	215,650000
Mehaigne wanze	1,336278	-0,113858	-0,689097	257,300000	255,800000	0,159900	291,650000	219,950000
Molignée warrant	0,965517	0,252220	-0,550801	287,150000	303,150000	0,238000	327,700000	212,910000
Ourthe hotton	3,875665	2,307094	6,25929997	242,450000	249,800000	0,225800	275,550000	184,160000
Ourthe nismont	3,443787	1,531504	1,829738623	242,450000	279,150000	0,228400	282,150000	184,790000
Ourthe occidentale mabombe	3,030303	2,500791	7,836789147	245,000000	250,800000	0,109400	276,750000	217,550000
Ourthe occidentale ortho	3,919355	3,139197	11,62119497	234,450000	243,450000	0,144700	268,600000	193,700000
Ourthe tabreux	3,959829	1,991381	6,026620578	243,620000	223,450000	0,221100	283,150000	179,550000
Semois chantemelle	1,940949936	0,861772194	0,561851989	275,150000	243,180000	0,382200	347,350000	139,400000
Semois membre	3,533040	1,909020146	4,467877713	247,800000	291,150000	0,182900	291,450000	177,450000
Senne steenkerque	1,283154122	1,008960078	1,516259592	243,800000	194,100000	0,135400	284,350000	202,700000
Sille isières	1,903225806	0,163512286	-0,921520285	243,800000	232,450000	0,105800	275,150000	208,100000
Thyle suzen	1,294915254	0,074384525	-0,897220369	225,450000	205,060000	0,433200	293,150000	33,350000
Ton hannoncourt	0,911216977	-0,193369855	-0,591909506	265,800000	243,450000	0,227400	321,500000	214,450000
Trouille hyon	1,486238532	0,183362086	0,58103888	269,300000	269,800000	0,241800	304,465000	221,450000
Vierre stramont	4,705882353	1,680388257	4,187200763	238,450000	243,800000	0,155900	275,810000	179,180000
Viroin treignes	2,145323741	0,804886348	0,786008097	256,800000	304,500000	0,135300	301,890000	216,650000

Pour les noms de variables, voir le tableau 5.

ont été calculées à l'aide d'un modèle numérique de terrain d'une résolution de 30 x 30 m (Source : IGN Belgique). Les informations sur l'occupation du sol et la superficie des forêts ont été tirées de la carte thématique des plans de secteurs (Source : D.G.A.T.L.P. : Cartographie de base à l'échelle de 1/10 000). Quant aux données climatiques, les annuaires climatologiques de l'Institut Royal Belge ont été utilisés. Pour les stations comportant des données manquantes, la méthode préconisée par ALEXANDRE *et al.* (2000) pour estimer les valeurs de la température et des précipitations aux échelles annuelles et mensuelles, a été appliquée. Cette méthode consiste à estimer la quantité de précipitation ou la température moyenne en fonction de l'altitude de la station (krigeage). Les informations concernant la géologie sont issues de la carte géologique de la Belgique au 1/40 000 (Source : D.G.A.T.L.P. : Cartographie de base). Pour chaque bassin versant, la superficie (en %) occupée par les roches perméables (ex. : calcaire, dolomite) et imperméables (ex. : schistes, quartzites, etc.) a été déterminée. Enfin, la densité de population par bassin versant a été calculée à partir des données statistiques de la population du Ministère de la Région wallonne en 2005. Tous les facteurs environnementaux utilisés sont repris dans le tableau 3 et leurs valeurs, pour chacun des bassins versants analysés, se trouvent au tableau 4.

2.3 Méthodes d'analyses statistiques

L'analyse statistique a été effectuée en quatre étapes.

La première étape a consisté à définir les différentes caractéristiques et les variables hydrologiques associées de chaque série annuelle des débits minimums (série constituée par les valeurs des débits les plus faibles mesurés chaque année) selon la méthodologie proposée par ASSANI *et al.* (2006a). Cette méthodologie est fondée sur le concept de « régime des débits naturels ». Ce concept permet d'établir une différence entre la notion « des caractéristiques des débits » et celle de « variables hydrologiques ». En effet, une caractéristique des débits est une propriété intrinsèque d'écoulement, alors qu'une variable hydrologique est une variable statistique qui permet de définir une caractéristique des débits. Chaque série annuelle des débits minimums peut être définie par six caractéristiques (ASSANI *et al.* 2006a) : le volume d'écoulement (magnitude), la fréquence, la période d'occurrence, la variabilité (de la magnitude et de la période d'occurrence) et enfin, la forme de courbe de distribution. Toutefois, le nombre de caractéristiques dépend de la série hydrologique. En ce qui concerne la série annuelle, on ne peut définir que cinq caractéristiques (le volume

Tableau 3. Facteurs environnementaux.
Table 3. Environmental factors.

Facteurs	Codes	Nom de la variable	Unités
Facteurs physiographiques	B ₁	Superficie du bassin versant	km ²
	B ₂	Longueur totale du cours d'eau	km
	B ₃	Pente moyenne du bassin versant	m•km ⁻¹
Localisation géographique	G ₁	Latitude	(°)
	G ₂	Longitude	(°)
Occupation et affectation des sols	A ₁	Superficie des forêts	%
	A ₂	Superficie des lacs et marais	%
	A ₃	Superficie de prairies	%
	A ₄	Superficie de cultures	%
Précipitations	P ₁	Totaux annuels	mm
	P ₂	Totaux estivaux (juin à août)	mm
	P ₃	Totaux automnaux (septembre à novembre)	mm
	P ₄	Totaux hivernaux (décembre à février)	mm
Température	T ₁	Moyenne annuelle	(°C)
	T ₂	Moyenne estivale (juin à août)	(°C)
	T ₃	Moyenne automnale (septembre à novembre)	(°C)
	T ₄	Moyenne hivernale (décembre à février)	(°C)
Unité géologique	GEOL	Pourcentage du substrat perméable	%
Humain	D	Densité de la population	hab•km ⁻²

Tableau 4. Les valeurs des facteurs environnementaux utilisés dans cette étude.
Table 4. Values of the environmental factors used in this study.

Rivières/Stations	Superficie Log	Longeur Log	Pente	Latitude Log	Longitude Log	% Forêt LOG	% Prairie LOG	% Culture LOG	% Lac LOG
Ambière martinrive	3,0321	3,2745	5,42	1,7031	0,7511	1,5918	1,6534	0,3139	-0,5670
Boeq yvoir	2,3601	2,3691	4,43	1,7019	0,6902	1,3476	1,6123	1,5169	-1,6904
Brouffe mariembourg	1,9036	2,2742	7,70	1,6998	0,6561	1,8536	1,3111	0,7832	-0,1475
Dendre occidentale ATH	2,3937	2,5193	2,90	1,7044	0,5774	0,2565	1,3469	1,7991	-0,3382
Dendre occidentale brugellette	2,0349	2,1616	2,07	1,7041	0,5867	0,9228	1,2964	1,8285	-0,3107
Dendre occidentale irchonwelz	2,1274	2,3374	2,16	1,7043	0,5744	0,7947	1,2704	1,8439	-1,3468
Eau blanches nismes	2,3980	2,6542	3,02	1,6997	0,6588	1,7118	1,5201	1,0730	-0,1415
Eau noire Couvain	2,2484	2,3467	6,35	1,6993	0,6533	1,7220	1,1872	0,6464	-0,2950
Geer nekum	2,6703	2,7059	1,59	1,7062	0,7540	0,2605	1,1544	1,7386	-1,2916
Grande gette st-jean-geest	2,1507	2,1872	4,89	1,7054	0,6878	0,6395	1,1682	1,8700	-0,4248
Haine boussoit	2,2299	2,3991	6,92	1,7030	0,6115	1,1106	1,3467	1,6324	-0,6778
Hermetton hastière	2,2201	2,4052	1,25	1,7007	0,6812	1,6665	1,5235	1,2428	-0,6799
Hermetton romedenne	2,0679	2,2301	5,00	1,7004	0,6733	1,6352	1,5494	1,2584	-0,5784
Houille Felenne	2,0572	2,1750	8,41	1,6993	0,6853	1,8166	1,4426	1,7462	-1,0506
Lesse daverdisse	2,4772	2,5765	6,98	1,6993	0,7101	1,7849	1,5247	0,6232	-4,0000
Lesse gendron	3,1084	3,2688	4,00	1,7008	0,6959	1,7640	1,4923	0,9350	-1,3098
Lesse ochamps	0,9800	1,1228	10,96	1,6983	0,7227	1,8268	1,3558	-4,0000	-1,6799
Lomme jemelle	2,4450	2,6038	8,65	1,7003	0,7212	1,8513	1,3675	0,5366	-1,5528
Méhaigne wanze	2,5460	2,6825	1,44	1,7037	0,7176	0,8467	1,2403	1,8421	-0,6198
Molignée warnant	2,0981	2,2161	6,54	1,7016	0,6840	1,4556	1,5661	1,4819	-0,6126
Ourthe hotton	2,9763	3,1727	3,70	1,7013	0,7357	1,6850	1,6504	0,6946	-0,9469
Ourthe nismont	2,8656	3,0441	4,64	1,7002	0,7539	1,6498	1,6800	0,7356	-0,8962
Ourthe occidentale mabombe	2,5033	2,6874	5,31	1,7002	0,7576	1,6792	1,6532	0,6571	-1,3468
Ourthe occidentale ortho	2,5863	2,7618	5,37	1,6999	0,7518	1,6130	1,7097	0,7910	-0,8928
Ourthe tabreux	3,2056	3,4028	2,54	1,7028	0,7432	1,6718	1,6298	0,4654	-1,0862
Semois chantemelle	1,9594	2,1904	2,31	1,6960	0,7520	1,3368	1,6069	0,3838	-0,9706
Semois membre	3,0885	3,3220	1,04	1,6978	0,6905	1,7445	1,5661	0,4487	-1,0414
Senne steenkerque	2,1613	2,3552	2,26	1,7045	0,6097	0,7163	1,3836	1,7923	-0,7799
Sille isières	1,7810	1,9491	3,46	1,7047	0,5826	0,9473	1,4334	1,7692	-4,0000
Thyle suzeril	1,8407	1,9094	6,04	1,7044	0,6595	1,4313	1,1578	1,7098	-0,4535
Ton harmoncourt	2,4722	2,5490	6,76	1,6949	0,7400	1,6634	1,4200	1,1605	-1,4685
Trouille hyon	2,3519	2,4180	5,64	1,7028	0,5983	0,7862	1,1608	1,6913	-0,6904
Vierre straumont	2,2610	2,4403	3,70	1,6972	0,7310	1,5650	1,7373	0,7853	-1,0809
Viroin trignes	2,7350	2,9147	3,14	1,6997	0,6693	1,7316	1,3983	0,9800	-0,2815

Tableau 4. (Suite) Les valeurs des facteurs environnementaux utilisés dans cette étude.
 Table 4. (Cont'd) Values of the environmental factors used in this study.

Rivières/Stations	Densité Population Log	Permeabilité Log	Précipitation totale annuelle	Précipitation hiver	Précipitation automne	Précipitation été	Précipitation moyenne annuelle	Température hiver	Température automne	Température été	Température
Ambière martinive	1,8366	0,6532	1104,50	296,10	274,30	272,30	7,75	0,66	8,57	14,86	
Bocq yvoir	2,0336	1,7160	937,50	237,50	232,40	241,00	8,57	1,72	9,33	15,53	
Brouffe mariembourg	1,4160	0,3979	932,10	237,90	235,90	234,40	8,91	2,17	9,52	15,90	
Dendre occidentale ATH	2,1455	1,6561	804,50	188,30	211,90	212,40	10,02	3,25	10,50	17,12	
Dendre occidentale brugelette	1,9917	1,6884	808,70	189,20	211,80	214,20	9,95	3,19	10,44	17,02	
Dendre occidentale irchonwelz	2,1900	1,4518	805,20	190,90	214,40	208,40	10,14	3,34	10,56	17,32	
Eau blanches nismes	1,7506	1,2122	961,70	248,30	246,90	237,60	8,85	2,11	9,46	15,84	
Eau noire Couvain	1,2975	-1,0000	1092,40	297,10	283,10	255,20	8,29	1,52	8,95	15,28	
Geer nekum	2,4475	1,8500	821,50	196,20	202,80	219,90	9,35	2,23	10,18	16,40	
Grande gerre st-jean-geest	2,1928	1,9685	808,60	192,40	203,40	215,70	9,34	2,48	10,11	16,21	
Haine boussoit	2,8206	1,7980	839,20	198,40	217,90	221,50	9,57	2,86	10,14	16,53	
Hermetton hastière	1,6742	1,5832	905,50	228,30	225,80	231,30	8,89	2,14	9,55	15,85	
Hermetton romedenne	1,7135	1,6730	903,85	227,65	225,70	231,10	8,91	2,15	9,57	15,86	
Houille Fétienne	1,5615	-1,0000	1130,40	313,00	290,40	259,50	8,14	1,36	8,81	15,11	
Lesse daverdisse	1,6008	-1,0000	1143,90	316,60	296,60	264,10	7,96	1,15	8,62	14,97	
Lesse gendron	1,6865	0,8513	1020,80	266,90	257,90	251,20	8,25	1,46	8,95	15,19	
Lesse ochamps	1,8022	-1,0000	1199,20	336,10	308,90	271,90	7,67	0,77	8,32	14,77	
Lomme jemelle	1,6894	-0,3979	1063,80	279,40	267,30	261,70	7,92	1,10	8,77	14,84	
Méhaigne wanze	2,0519	1,8162	835,30	201,40	208,90	221,90	9,15	2,19	9,94	16,10	
Molignée warnant	1,6990	1,7110	925,40	235,00	230,40	235,20	8,73	1,94	9,43	15,69	
Ourthe hortonn	1,5283	0,7634	1026,30	269,10	255,50	258,60	7,68	0,68	8,41	14,78	
Ourthe nismont	1,5359	0,6232	1044,50	276,50	260,10	261,00	7,56	0,55	8,29	14,69	
Ourthe occidentale mabombe	1,4768	0,8062	1028,70	270,90	254,70	260,70	7,55	0,52	8,36	14,66	
Ourthe occidentale ortho	1,5816	0,2788	1053,10	283,00	265,70	262,60	7,58	0,58	8,28	14,70	
Ourthe tabreux	1,6448	1,0212	983,90	252,90	243,50	252,70	8,00	1,02	8,75	15,06	
Semois chantemelle	2,2669	1,8293	1073,40	301,80	275,00	247,90	8,34	1,25	8,87	15,74	
Semois membre	1,7669	1,2718	1172,80	334,60	308,70	259,30	8,22	1,20	8,74	15,34	
Senne stenkerque	2,3744	1,6493	830,10	200,60	215,10	217,10	9,78	3,02	10,35	16,78	
Sille isières	2,0728	1,0531	802,80	188,50	212,90	210,80	10,05	3,27	10,51	17,15	
Thyle suzeril	2,2332	1,9269	844,50	206,20	214,20	218,30	9,33	2,59	10,06	16,13	
Ton harnoncourt	2,0397	1,8585	1036,30	288,30	267,10	240,20	8,71	1,66	9,21	16,11	
Trouille hyon	2,2526	1,7520	833,30	201,20	214,30	218,80	9,73	3,00	10,24	16,75	
Vierre straimont	1,8407	-1,0000	1189,30	337,50	310,30	266,20	7,87	0,95	8,56	15,02	
Viroin treignes	1,7663	1,0934	1007,10	265,50	258,80	243,60	8,66	1,90	9,31	15,64	

d'écoulement ou magnitude, la fréquence, la variabilité, la période d'occurrence et la forme de courbe de distribution). Dans le tableau 5 sont consignées les variables hydrologiques qui ont été utilisées pour définir ces cinq caractéristiques fondamentales. À ce propos, il convient de préciser qu'une caractéristique des débits peut être définie par une infinité des variables hydrologiques. Toutefois, ASSANI *et al.* (2006b) ont démontré qu'une caractéristique peut être définie entièrement par deux variables hydrologiques, car toutes les variables qui définissent une caractéristique des débits sont corrélées entre elles.

La seconde étape a consisté à synthétiser l'information au moyen de l'analyse en composantes principales (SANDERS, 1989). Cette analyse avait pour objectif de transformer les variables hydrologiques en caractéristiques des débits (ASSANI *et al.* 2006a). Elle a été appliquée à la matrice des corrélations qui, moins sensible aux valeurs extrêmes, permet d'éliminer l'effet provoqué par la variabilité locale d'un site. Afin de déterminer le nombre des composantes statistiquement significatives, le critère de KAISER (1960) a été appliqué dans le but de tenir compte du plus grand nombre possible de composantes principales significatives. Selon ce critère, une

composante principale est significative lorsque sa valeur propre est supérieure ou égale à un.

À la troisième étape, les rivières ont été regroupées en fonction de leurs caractéristiques (notes factorielles des composantes principales significatives) des débits au moyen de l'analyse ascendante hiérarchique (SANDERS, 1989). Dans le cadre de ce travail, le critère d'agrégation de Ward a été choisi en raison de son avantage à rechercher, à chaque étape, une partition telle que la variance intra-classe soit minimale et la variance inter-classe soit maximale (LEBART *et al.*, 2004). Pour caractériser les différentes classes formées au moyen des variables hydrologiques, les valeurs moyennes des caractéristiques des débits minimums annuels ont été comparées. Rappelons que les deux rivières dont les débits sont artificiellement influencés ont été incluses dans l'analyse ascendante hiérarchique, afin de pouvoir comparer leur comportement à celui des rivières dont les débits ne sont pas influencés.

Enfin, à la dernière étape, les coefficients de corrélation entre les composantes principales, extraites des matrices des variables hydrologiques et des facteurs environnementaux, ont été calculés selon la méthode proposée par ASSANI *et al.* (2006a). Cette étape a ainsi permis de déterminer les facteurs

Tableau 5. Variables hydrologiques utilisées pour définir les cinq caractéristiques des débits minimums annuels.
Table 5 Hydrological variables used to define the five characteristics of annual minimum flows.

Caractéristiques	Codes	Variables statistiques	Signification
Volume d'écoulement et fréquence	MF ₁	Mo	Moyenne
	MF ₂	Mc	Médiane
	MF ₃	P ₁₀	Percentile 10
	MF ₄	P ₉₀	Percentile 90
	MF ₅	Q _{min}	Le débit le plus faible de la série
	MF ₆	Q _{max}	Le débit le plus élevé de la série
Variabilité interannuelle du volume d'écoulement	VMF ₇	(P ₉₀ -P ₁₀)/Me	
	VMF ₈	CV	Coefficient de variation (%)
Forme de la courbe de distribution	FC ₉	(Q _{max} -Q _{min})/Me	
	FC ₁₀	B ₁	Coefficient d'asymétrie
	FC ₁₁	B ₂	Coefficient d'aplatissement
Date d'occurrence (en jours juliens)	DO ₁₂	Mo	
	DO ₁₃	Mc	
	DO ₁₄	P ₉₀	
Variabilité interannuelle des dates d'occurrence	VDO ₁₅	P ₁₀	
	VDO ₁₆	CV	
	VDO ₁₇	(P ₉₀ -P ₁₀)/Me	

environnementaux qui influencent linéairement la variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums annuels en Belgique.

3. RÉSULTATS

3.1. Analyse ascendante hiérarchique des caractéristiques des débits minimums annuels

L'analyse hiérarchique ascendante a été appliquée sur les notes factorielles des composantes principales extraites des données hydrologiques. Les données sur les deux rivières, dont les débits sont artificiellement influencés, ont été incluses dans cette analyse afin de pouvoir déterminer leur comportement par rapport aux rivières naturelles. Pour regrouper les rivières en classes homogènes, nous avons procédé à une coupure du dendrogramme au niveau 0,1. Cette coupure a permis de regrouper les rivières analysées en cinq classes ou régions hydrologiques homogènes (Figure 2). En ce qui concerne les deux rivières dont les débits sont artificiellement influencés, elles forment la première sous-classe (rivières 2 et 26) de la classe 5 (Figure 2). Ce résultat suggère que le pompage des eaux souterraines de la rivière Bocq à Yvoir, et la présence d'une végétation abondante dans la Semois à Chantemelle, induiraient les mêmes types d'impacts sur les caractéristiques des débits minimums annuels. Pour corriger les effets de ces impacts sur les valeurs des débits, on suggère d'appliquer la méthode de proportionnalité, basée sur la relation entre la taille des bassins versants et les valeurs des débits.

Pour caractériser ces cinq classes, les valeurs moyennes des caractéristiques des débits minimums annuels ont été comparées (Tableau 6) en excluant, bien entendu, les deux rivières. Les classes IV (Geer, Grande Gette, Thyle) et V (Haine, Molignée et Ton) sont caractérisées par des valeurs relativement élevées de la magnitude (débits spécifiques) et de la variabilité de la période d'occurrence des débits minimums annuels, mais par des valeurs relativement faibles de coefficients d'asymétrie et de la variabilité du volume d'écoulement-fréquence (Tableau 6). Les deux classes se distinguent entre elles par la date d'occurrence des débits minimums annuels. Ceux-ci surviennent tôt dans l'année pour la classe IV, mais tard pour la classe V. Les rivières de ces deux classes coulent toutes sur un substrat perméable. Ceci explique les valeurs élevées de leur volume d'écoulement des débits minimums annuels. Les rivières de la classe IV drainent la région limoneuse d'Hesbaye, alors que celles de la classe V coulent en majorité dans le Condroz (présence du calcaire) et la Lorraine (sable).

Les classes II (Dendre, Hermeton, Senne, Eau blanche, Trouille, Viroin, Mehaigne, Sille) et III (Brouffe, Dendre,

Houille, Hermeton, Ourthe, Vierre) sont principalement caractérisées par de faibles valeurs du volume d'écoulement-fréquence. Par rapport à la classe II, la classe III est caractérisée par des valeurs plus élevées de la variabilité du volume d'écoulement et de la période d'occurrence ainsi que du coefficient d'asymétrie. La plupart des rivières de ces deux classes drainent des substrats peu perméables ou imperméables de la Fagne, d'Ardenne et de la région limoneuse hennuyère. Enfin, la première classe, qui regroupe 11 rivières, est caractérisée par des valeurs intermédiaires du volume d'écoulement, mais par une forte variabilité de ce volume d'écoulement et des valeurs très élevées du coefficient d'asymétrie. Quant aux deux rivières dont les mesures des débits sont artificiellement influencées, cette influence artificielle se traduit principalement par une hausse de la variabilité du volume d'écoulement et de la période d'occurrence des débits minimums annuels (Tableau 7). Enfin, mentionnons que le Bocq, soumis au pompage, a un coefficient d'asymétrie plus élevé que les autres rivières de la classe V.

En guise de conclusion, l'analyse ascendante hiérarchique met en évidence à la fois l'influence de la lithologie, et des facteurs anthropiques sur la variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums.

3.2. Analyse des corrélations entre les facteurs environnementaux et les caractéristiques des débits minimums annuels

Rappelons que pour calculer les corrélations, nous avons procédé par la réduction du nombre des facteurs environnementaux au moyen de l'analyse en composantes principales. Cette méthode a également été appliquée pour les données hydrologiques, mais en excluant les deux rivières dont les débits sont artificiellement influencés. Trois composantes principales significatives ont été extraites de la matrice des corrélations calculées entre les facteurs environnementaux. Ces composantes expliquent près de 82 % de la variance totale, dont 60 % environ sont expliquées par la première composante principale (Tableau 8). Celle-ci est corrélée à quatre types de facteurs environnementaux : les facteurs de localisation (représentés ici par la longitude et la latitude), le facteur climatique (températures et précipitations), les facteurs d'utilisation des sols (densité de population, pourcentage de cultures, de forêts et de prairies) et, enfin, le facteur géologique (perméabilité). De ces quatre facteurs, les variables qui définissent le climat (températures et précipitations) sont les mieux corrélées à la première composante. En effet, les valeurs de saturation de ces variables sont presque toutes supérieures à 0,90. La température et la latitude sont corrélées négativement à cette composante, alors que les précipitations et la longitude le sont positivement. La seconde composante principale est corrélée aux facteurs qui décrivent les caractéristiques physiographiques des bassins versants. La dernière composante principale significative est positivement corrélée à la superficie

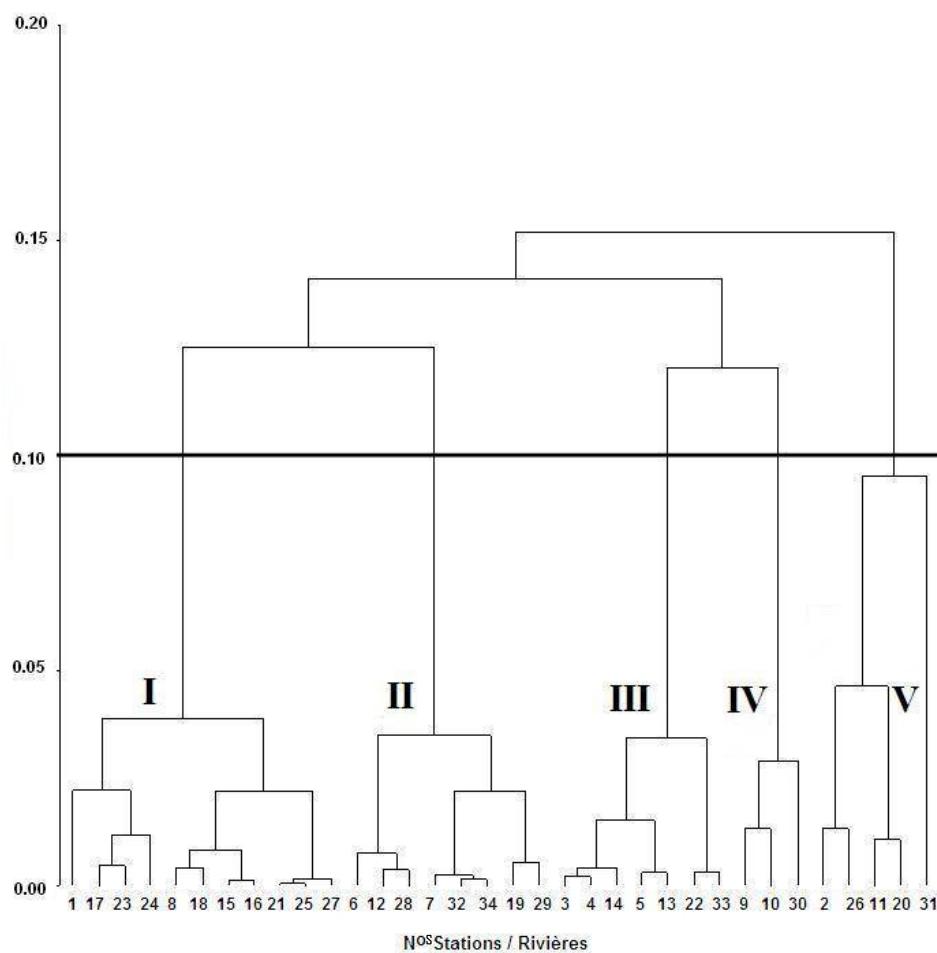


Figure 2. Dendrogramme - Analyse ascendante hiérarchique. Pour les numéros de stations, voir tableau 1.
Dendrogram - Ascending hierarchical classification. For station numbers, see Table 1.

Tableau 6. Comparaison des valeurs moyennes des caractéristiques des débits minimums annuels entre les cinq classes de rivières wallonnes définies par la méthode de la classification hiérarchique ascendante (méthode de Ward).

Table 6. Comparison of average values of annual minimum flow characteristics for five classes of rivers in Wallonia as defined by the ascending hierarchical classification method (Ward method).

Classes	Volume d'écoulement-fréquence*	Variabilité du volume d'écoulement (CV en %)	Coefficient d'asymétrie	Période d'occurrence (en jours juliens)	Variabilité de la période d'occurrence (CV en %)
I	2,1	0,55	2,1	245	0,16
II	1,6	0,38	0,64	249	0,16
III	1,4	0,64	1,01	249	0,21
IV	3,8	0,34	0,36	233	0,36
V	5,6	0,28	0,13	271	0,21
Toutes les rivières	2,3	0,48	1,13	248	0,20

* = les valeurs sont exprimées en $L \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$. N.B. Le Bocq à Yvoir et la Semois à Chantemelle ont été exclus de ce calcul.

Tableau 7. Comparaison des valeurs des variables hydrologiques entre les deux rivières influencées et les trois rivières non influencées de la classe V.

Table 7. Comparison of hydrological variables values between influenced rivers (Bocq at Yvoir and Semois at Chantemelle) and three pristine class V rivers.

Rivières	Volume d'écoulement-fréquence*	Variabilité du volume d'écoulement (CV en %)	Coefficient d'asymétrie	Période d'occurrence (en jours juliens)	Variabilité de la période d'occurrence (CV en %)
Bocq à Yvoir	3,9	0,42	0,07	241	0,28
Semois à Chantemelle	4,9	0,39	0,86	243	0,38
Haine à Boussoit	4,2	0,34	0,33	267	0,17
Molignée à Warnant	4,7	0,23	0,25	303	0,24
Ton à Harnoncourt	7,8	0,25	-0,19	243	0,23

Tableau 8. Valeurs de saturation des facteurs environnementaux sur les sept composantes principales après rotation varimax.

Table 8. Loadings of environmental factors on the seven principal components after varimax rotation of the axes.

Facteurs environnementaux	CPEI	CPEII	CPEIII
B ₁	0,176	0,938	0,053
B ₂	0,208	0,933	0,068
B ₃	0,496	-0,668	-0,012
G ₁	-0,790	0,108	0,027
G ₂	0,720	0,355	0,052
A ₁	0,861	-0,034	0,057
A ₂	-0,073	0,056	0,952
A ₃	0,603	0,475	-0,173
A ₄	-0,692	0,367	0,090
P ₁	0,950	0,007	-0,187
P ₂	0,972	0,132	-0,112
P ₃	0,898	-0,052	-0,255
P ₄	0,939	-0,002	-0,190
T ₁	-0,958	-0,207	0,012
T ₂	-0,946	-0,186	-0,029
T ₃	-0,972	-0,185	0,048
T ₄	-0,934	-0,260	0,024
GEOL	-0,749	0,296	0,348
D	-0,754	-0,096	-0,075
Valeurs propres	11,56	2,94	1,06
VTEC (%)	59,7	75,5	82

VTEC = Variance totale expliquée cumulée. Les valeurs de saturation $\geq 0,6$ apparaissent en gras.

des lacs et marais. Il importe de souligner que la presque majorité de ces plans d'eau sont artificiels.

En ce qui concerne les variables hydrologiques, quatre composantes principales ont été extraites. Leur variance totale expliquée atteint environ 90 % (Tableau 9). La variance totale expliquée par la première composante dépasse 45 %. La première composante principale est corrélée aux variables hydrologiques qui définissent le volume d'écoulement (magnitude) et la fréquence des débits minimums annuels, alors que la seconde composante l'est à la variabilité interannuelle de la magnitude et aux variables qui définissent la forme de la courbe de distribution. La composante III est principalement corrélée à la variabilité interannuelle des dates d'occurrence des débits

minimums. La dernière composante principale est corrélée aux dates d'occurrence des débits minimums annuels.

L'analyse ascendante hiérarchique ne permet pas d'analyser l'influence de tous les facteurs environnementaux susceptibles d'influencer la variabilité spatiale des débits minimums annuels. L'analyse de corrélation a été ainsi appliquée entre les composantes principales extraites des facteurs environnementaux et les caractéristiques des débits. Les coefficients de corrélation calculés entre les trois composantes principales extraites des facteurs environnementaux et les quatre composantes principales extraites des variables hydrologiques sont repris au tableau 10. Il ressort de ce tableau que la caractéristique hydrologique « la forme de

Tableau 9. Valeurs de saturation des variables hydrologiques sur les cinq composantes principales après rotation varimax.
Table 9. Loadings of hydrological variables on the five principal components after varimax rotation of axes.

Variables hydrologiques	CPH1	CPH2	CPH3	CPH4
MF ₁	0,954	0,184	0,172	0,008
MF ₂	0,925	0,217	0,188	-0,022
MF ₃	0,963	0,205	0,060	-0,079
MF ₄	0,926	0,122	0,248	0,127
MF ₅	0,903	0,247	0,092	-0,121
MF ₆	0,886	-0,373	0,167	0,020
VMF ₇	-0,557	-0,399	0,266	0,560
VMF ₈	-0,528	-0,689	0,171	0,382
FC9	-0,340	-0,890	-0,005	0,239
FC10	-0,124	-0,920	-0,158	-0,142
FC11	0,035	-0,898	-0,229	-0,244
DO ₁₂	0,133	0,109	-0,362	0,799
DO ₁₃	0,499	0,220	-0,642	0,418
DO ₁₄	0,396	0,329	-0,190	0,372
VDO ₁₅	-0,097	-0,010	-0,939	0,151
VDO ₁₆	0,277	0,278	0,823	0,035
VDO ₁₇	0,292	0,119	0,882	-0,058
Valeurs propres	7,913	3,256	2,687	1,477
VTEC (%)	46,5	65,6	81,4	90,1

VTEC = Variance totale expliquée cumulée. Les valeurs de saturation $\geq 0,6$ apparaissent en gras.

Tableau 10. Coefficients de corrélation entre les caractéristiques des débits minimums annuels et les facteurs environnementaux.

Table 10. Correlation coefficients between characteristics of annual minimum flows and environmental factors.

	CPH1	CPH2	CPH3	CPH4
CPEI	0,149	-0,767**	-0,097	0,159
CPEII	0,016	-0,311*	-0,116	0,0340
CPEIII	0,083	0,148	0,198	0,121

Les valeurs de coefficients de corrélation significatives apparaissent en gras. ** = significatif au seuil de 1 %; * = significatif au seuil de 10 %.

courbe de distribution » de la magnitude, associée à la deuxième composante principale (CPH2), est significativement corrélée à la première composante principale (CPEI), associée aux divers facteurs environnementaux (facteurs de localisation, climatique et géologique) et, dans une moindre mesure, à la deuxième composante principale (CPEII), associée au facteur qui définit les caractéristiques physiographiques des bassins versants. Les autres caractéristiques hydrologiques ne sont linéairement corrélées à aucun facteur environnemental. Il est intéressant de faire remarquer que contrairement au pompage d'eau, la création artificielle des plans d'eau dans un bassin versant n'affecte pas les caractéristiques des débits minimums annuels. Cette conclusion est importante dans la gestion et l'aménagement des bassins versants.

4. DISCUSSION ET CONCLUSION

Les processus de genèse des débits sont complexes à l'échelle d'un bassin versant. Cette complexité s'amplifie lorsqu'on les compare d'un bassin versant à un autre en raison de l'augmentation des facteurs impliqués. Pourtant, l'identification de ces derniers est fort importante pour pouvoir assurer l'intégrité écologique des cours d'eau naturels et anthropisés. Par ailleurs, selon le paradigme écologique de « régime des débits naturels », cette intégrité écologique ne peut efficacement être assurée que si on tient compte de toutes les caractéristiques fondamentales des débits (POFF *et al.*, 1997; RICHTER *et al.*, 1996). Par conséquent, l'identification de tous les facteurs environnementaux et anthropiques qui influencent

la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des débits devient un enjeu important dans la gestion des écosystèmes aquatiques. En effet, chaque caractéristique des débits joue un rôle précis dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Tout changement qui affecte l'une de ces caractéristiques peut perturber plus ou moins profondément ce fonctionnement, comme l'ont démontré plusieurs travaux en écologie aquatique et en géomorphologie fluviale (BUNN et ARTHINGTON, 2002; GRAF, 2006; NILSSON et SVEDMARK, 2002; PINAY *et al.*, 2002 ; POFF *et al.*, 1997). Cependant, cet aspect, c'est-à-dire la prise en compte de toutes les caractéristiques des débits dans les études hydrologiques, est encore très peu documenté en hydrologie. Ainsi, bien que nos connaissances sur les facteurs de variabilité spatiale de ces caractéristiques puissent être anticipées, elles ne sont encore que peu documentées.

L'application de ce paradigme écologique a permis de déterminer les différentes caractéristiques des débits à une échelle d'analyse donnée et les facteurs qui influencent leur variabilité spatiale. C'est ainsi que son application en Wallonie a permis de déterminer toutes les caractéristiques des débits minimums annuels. Celles-ci ont été définies à partir de 17 variables hydrologiques au moyen de l'analyse en composantes principales. Chaque caractéristique a été associée à une composante principale dont la variance totale expliquée par les quatre principales composantes significatives a atteint 90 %. La classification des rivières en fonction de ces composantes principales au moyen de la méthode de classification ascendante hiérarchique a mis en évidence un lien entre la nature du substrat et les caractéristiques des débits minimums annuels. En effet, les rivières qui drainent un substrat perméable (régions de Condroz, de la Hesbaye et de la Lorraine) sont caractérisées par un volume d'écoulement relativement élevé et une occurrence tardive des débits minimums annuels. Quant aux rivières qui coulent sur un substrat imperméable ou peu perméable (Ardenne, Fagne et la région limoneuse hennuyère), celles-ci sont caractérisées par des débits minimums relativement faibles, mais des valeurs élevées de coefficients d'asymétrie et de la variabilité interannuelle du volume d'écoulement (magnitude). De plus, cette analyse ascendante hiérarchique a aussi permis de quantifier les effets de pompage (Bocq à Yvoir) et de la végétation (Semois à Chantemelle) sur les caractéristiques des débits minimums annuels. L'influence de ces deux facteurs se traduit principalement par une hausse de la variabilité de la magnitude et de la période d'occurrence des débits minimums annuels par rapport aux rivières naturelles. L'analyse des corrélations entre les caractéristiques des débits et les facteurs environnementaux a révélé que la variabilité de la magnitude et la forme de courbe de distribution (coefficients d'asymétrie et d'aplatissement) sont fortement corrélées à de nombreux facteurs comme le climat, l'utilisation des sols ainsi que la localisation des bassins versants et les caractéristiques physiographiques des bassins versants. Les autres caractéristiques hydrologiques ne sont

corrélées significativement à aucun facteur environnemental. Il s'ensuit que la lithologie semble être le principal facteur de variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums annuels en Wallonie.

Cette étude démontre la nécessité de tenir compte de toutes les caractéristiques des débits afin de pouvoir identifier tous les facteurs qui influencent leur variabilité spatiale. Presque toutes les études consacrées à l'analyse de la variabilité spatiale des débits minimums annuels se limitent généralement au volume d'écoulement. Cette approche ne permet pas de déterminer tous les facteurs impliqués dans la variabilité spatiale de ces débits.

5. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'équipe du Laboratoire d'hydrographie et de géomorphologie fluviale du professeur M. François Petit de l'Université de Liège en Belgique. Nous remercions également le programme de mobilité étudiante de l'Université du Québec à Trois-Rivières qui a permis à la première auteure de réaliser un stage en Belgique.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABI-ZEID I. et B. BOBÉE (1999). La modélisation stochastique des étiages : une revue bibliographique. *Rev. Sci. Eau*, 12, 459-484.
- ALEXANDRE J., M. ERPICUM, G. MABILLE et Y. CORNET (2000). Précipitations atmosphériques et altitude. Prélude à une cartographie des montants mensuels et annuels sur le territoire de la Belgique. *Public. Assoc. Intern. Climat.*, 11, 219-226.
- ANDRÉASSIAN V. (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *J. Hydrol.*, 291, 1-27.
- ANNEAR T.C et C. CONDOR (1984). Relative bias of several fisheries instream flow methods. *North. Am. J. Fish. Manage.*, 4, 531-539.
- AQUALIM (2006). *Cours d'eau non navigables de Wallonie*. *Données : Liste des stations et téléchargements*. <http://aqualim.wallonie.be/index.jsp> (Consultation 20 mai 2006).
- ASSANI A.A, E. GRAVEL, T. BUFFIN-BELANGER et A.G. ROY (2005). Impacts des barrages sur les

- caractéristiques des débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada). *Rev. Sci. Eau*, 18, 103-127.
- ASSANI A.A., S. TARDIF et F. LAJOIE (2006a). Statistical analysis of factor affecting the spatial variability of annual minimum flow characteristics in a cold temperate continental region (southern Quebec, Canada). *J. Hydrol.*, 328, 753-763.
- ASSANI A.A., S. TARDIF, S. BENSEGHIR, M. MESFIOUI et A. CHALIFOUR (2006b). Développement d'une nouvelle méthode de régionalisation basée sur le concept de « régime des débits naturels » : la méthode éco-géographique. *Rev. Sci. Eau*, 19, 365-380.
- ASSANI A.A., S. TARDIF, F. LAJOIE et A. Chalifour (2008). Application of the « Natural flow regime » concept to the development of a comprehensive streamflow analysis approach. Example of annual maximum spring flood in Southern Quebec. In : *Water Resources Research Progress*. E. HEIKKINEN (Éditeur), Novapublishers, New-York, NY, USA, pp. 235-259.
- BONSAL B. et A. SHABBAR (2008). Impacts of large-scale circulation variability on low streamflows over Canada : a review. *Can. Water Resour. J.*, 33, 137-154.
- BUNN S.E et A.H. ARTHINGTON (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environ. Manage.*, 30, 492-507.
- CAZAUBON A. et J. GIUDICELLI (1999). Impacts of the residual flow on the physical characteristics and benthics community (algae, invertebrates) of a regulated Mediterranean River, the Durance, France. *Regul. Rivers Res. Manage.*, 15, 441-461.
- COSANDEY C., V. ANDRÉASSIAN, C. MARTIN, J.F. DIDON-LESCOT, J. LAVABRE, N. FOLTON, N. MAYHYS et D. RICHARD (2005). The hydrological impact of the Mediterranean forest: a review of French research. *J. Hydrol.*, 301, 235-249.
- DAVISON B. et G. VAN DER KAMP (2008). Low-flows in deterministics modelling: a brief review. *Can. Water Resour. J.*, 33, 181-194.
- DRACUP J.A., K.S. LEE et E.G. PAULSON (1980). On the definition of droughts. *Water Resour. Res.*, 16, 297-302.
- GIBSON R.J. et R.A. MYERS (1988). Influence of seasonal river discharge on survival of juvenile Atlantic Salmon, *Salmo Salar*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 45, 344-348.
- GRAF W.L. (2006). Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 79, 336-360.
- GURNELL A.M. (1993). How many reservoirs? An analysis of flow recession from a glacier basin. *J. Glaciol.*, 39, 409-414.
- GUSTARD A. et K.M. IRVING (1994). Classification of the low-flow response of European soils. FRIEND: Flow regimes from international Experimental and network data. *IAHS Publ.*, 221, 113-117.
- HEJAZI M.I. et G.E. MOGLEN (2006). Regression-based approach to low-flow prediction in the Maryland Piedmont region under joint climate and land use change. *Hydrol. Process.*, 21, 1793-1801.
- HOPKINSON C. et G.I. YOUNG (1998). The effect of glacier wastage on the flow of the Bow River at Banff, Alberta, 1951-1993. *Hydrol. Process.*, 12, 1745-1762.
- HU W-W., G.-X. WANG, W. DENG et S.-N. LI (2008). The influence of dams on ecohydrological conditions in the Huaihe River basin, China, *J. Hydrol.*, 33, 233-241.
- KAISER H.F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educ. Psychol. Measure.*, 20, 141-151.
- KHALIQ M.N., T.B.J.M. OUARDA, P. GACHON et L. SUSHANA (2008). Temporal evolution of low-flow regimes in Canadian rivers. *Water Resour. Res.*, 44, W08436, doi: 10.1029/2007WR006132.
- LAGIEWKA H. (1981). *Les pluies. Régimes pluviométriques annuels. Recherche des facteurs géographiques et météorologiques influençant leur répartition*. Mémoire de Licence en Sciences Géographiques, Université de Liège, France, 258 p.
- LEBART L., A. MORINEAU et M. PIRON (2004). *Statistique exploratoire Multidimensionnelle*. Dunod, Paris, 3^e édition, 439 p.
- MAGILLAN F.J. et K. NISLOW (2001). Long-term changes in regional hydrologic regime following impoundment in a humid-climate watershed. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 37, 1551-1569.
- MAGILLAN F.J. et K. NISLOW (2005). Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 71, 61-78.
- MINISTÈRE DE LA RÉGION WALONNE et D.G.A.T.L.P. (2005). *Données : Population de la Belgique par commune en*

- 2005, *Carte géologique de base et carte thématique des plans de secteur*. www.wallonie.be (Consulté le 20 mai 2006).
- MUNSON A.B. et J.J. DELFINO (2007). Minimum wet-season flows and levels in southwest Florida rivers. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 43, 522-532.
- NILSSON C. et M. SVEDMARK (2002). Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: riparian plant communities. *Environ. Manage.*, 30, 468-480.
- OUARDA T.B.M.J., C. CHARRON et A. ST-HILAIRE (2008). Statistical models and the estimation of low flows. *Can. Water Resour. J.*, 33, 195-206.
- ÖNÖZ B. et M. BAYAZIT (2002). Troughs under threshold modeling of minimum flows in perennial streams. *J. Hydrol.*, 258, 187-197.
- PETIT F. (1985). L'évolution de la charge en suspension d'une rivière ardennaise au cours de périodes de crues. *Bull. Soc. Geogr., Liège*, 21, 97-104.
- PETIT F., E. HALLOT et G. HOUTRECHT (2005). Évaluation des puissances spécifiques de rivières de moyenne et de haute Belgique. *Bull. Soc. Geogr. Liège*, 46, 37-50.
- PETTS G.E. (1995). Water allocation to protect river ecosystems. *Regul. Rivers Res. Manage.*, 12, 353-365.
- PINAY G., J.C. CLÉMENT et R.J. NAIMAN (2002). Basic principles and ecological consequences of changing water regimes on nitrogen cycling in fluvial systems. *Environ. Manage.*, 30, 481-491.
- POFF N.L., J.D. ALLAN, M.B. BAIN, J.R. KARR, K.L. PRESTEGAARD, B.D. RICHTER, R.E SPARKS et J.C. STROMBERG (1997). The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47, 769-784.
- PYRON M. et K. NEUMAN (2008). Hydrologic alteration in the Wabash river watershed, USA. *River Res. Appl.*, 24, 1175-1184.
- REILY P.W. et W.C. JOHNSON (1982). The effects of altered hydrologic regime on tree growth along the Missouri River in North Dakota. *Can. J. Bot.*, 60, 2410-2423.
- RICHTER B.D., J.V. BAUMGARTNER, J. POWELL et D.P. BRAUN (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem. *Conserv. Biol.*, 10, 1163-1174.
- ROBINSON M., A.-L. COGNARD-PLANCQ, C. COSANDEY, J. DAVID, P. DURAND, H.-W. FÜHRER, R. HALL, M.O. HENDRIQUES, V. MARC, R. McCARTHY, M. McDONNELL, C. MARTIN, T. NISBET, P. O'DEA, M. RODGERS et A. ZOLLNER (2003). Studies of the impact of forest on peak flows and baseflow: a European perspective. *Forest Ecol. Manage.*, 186, 85-97.
- ROOD S.B., J.M. MAHONEY, D.E. REID et L. ZILM (1995). Instream flows and the decline of riparian cottonwoods along the St. Mary River, Alberta. *Can. J. Bot.*, 73, 1250-1260.
- SANDERS L. (1989). *L'analyse des données appliquée à la géographie*. GIP RECLUS (Col. Alidade), Montpellier, France, 267 p.
- SCATENA F.N. (2004). A survey of methods for setting minimum instream flow standards in the Caribbean Basin. *River Res. Appl.*, 20, 127-135.
- SETHY (2006). Cours d'eau navigables de Wallonie. *Hydrologie : Données archivées et statistiques*. <http://voies-hydrauliques.wallonie.be> (Consultation 20 mai 2006).
- SMAKHTIN V.U. (2001). Low flow hydrology: a review. *J. Hydrol.*, 240, 147-186.
- YANG T., ZHANG Q., Y.D. CHEN, X. TAO, C.-Y. XU et X. CHEN (2008). A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China, *Hydrol. Process.*, 22, 3829-3843.
- YUNUS A.J.M., N. NAKAGOSHI et K.O. SALLEH (2003). The effects of drainage basin geomorphometry on minimum low flow discharge: the study of small watershed in Kelang River Valley in Peninsular Malasia. *J. Environ. Sci.*, 15, 249-262.
- YUREKLI K. et F. OZTURK (2003). Stochastic modeling of annual maximum and minimum streamflow of Kelkit stream. *Int. Water Resour. Ass., Water Int.*, 28, 433-441.