

Analyse de la variation spatio-temporelle de la morphologie du chenal de la Warche en amont du barrage de Bütgenbach (Belgique)

by

ALI A. ASSANI, FRANÇOIS PETIT, THOMAS BUFFIN-BÉLANGER et ANDRÉ G. ROY

avec 4 figures et 3 tableaux

Résumé. Cet article présente les résultats d'une analyse de la variabilité spatiale et temporelle de caractéristiques morphométriques du chenal de la Warche (Ardennes, Belgique). La section étudiée se situe en amont du barrage de Bütgenbach construit en 1932. L'analyse de variabilité spatiale se fonde sur 153 coupes transversales équidistantes réalisées en 1966 par le Ministère de l'Agriculture belge. Appliqués sur les séries longitudinales de profondeur et de largeur, les tests de Mann-Kendall et de Pettitt font ressortir (1) un changement significatif de la profondeur et (2) deux changements significatifs de la largeur le long du chenal. Le changement de profondeur survient à l'aval de la confluence de la Warche avec le Tiefenbach et représente une diminution de 11%. Cet exhaussement résulterait de l'accumulation des matériaux provenant de l'érosion latérale qui a affecté le chenal dans le tronçon en aval de cette confluence. Les deux changements de largeur surviennent également en aval de confluences. De l'amont vers l'aval, ces changements présentent des augmentations de 32 et 82% de la largeur respectivement. L'analyse de la variabilité temporelle se fonde sur des comparaisons de largeurs et profondeurs moyennes provenant de données topométriques faites en 1966 et en 1996 au moyen du test *t* de Student. Ces comparaisons révèlent (1) des augmentations significatives de la largeur sur l'ensemble du chenal et (2) une diminution de la profondeur dans la partie du chenal située en amont de la confluence entre la Warche et le Tiefenbach. Ces changements morphologiques seraient associés à la diminution de la charge en suspension provenant des modifications dans l'utilisation du sol, les cultures ayant été remplacées par des prairies permanentes et par des forêts dans l'ensemble du bassin versant de la Warche au cours du 20^{ème} siècle.

Abstract. *Spatio-temporal variability of the Warche river morphology upstream from Bütgenbach dam (Belgium).* – This paper presents results from the analysis of the spatial and temporal variability of the Warche river morphology upstream from the Bütgenbach dam, Ardennes, Belgium. The analysis of the downstream variability is realised from 153 measurements of river width and depth made in 1966 by the Ministère de l'Agriculture Belge. Mann-Kendall and Pettitt tests performed on these spatial series reveal (1) one significant river depth change and (2) two significant river width changes. The change in depth occurs downstream from the Warche-Tiefenbach confluence and corresponds to a 11% decrease. This is due to the accumulation of sediment supplied by the lateral erosion occurring downstream from the confluence. Both changes in river width also take place at confluence junctions and correspond, from upstream to downstream, to 32 and 82% increase respectively. The analysis of the tem-

0372-8854/03/0469 \$ 3.75

© 2003 Gebrüder Borntraeger, D-14129 Berlin · D-70176 Stuttgart

poral variability is realised by *t*-test comparisons of river width and depth measurements made in 1966 and 1996. Downstream from the Warche-Tiefenbach confluence, the mean river width increases by 18% from 1966 to 1996. The river depth does not change significantly in this river section. Upstream from the Warche-Tiefenbach confluence, the river width has significantly increased from 1966 to 1996 by as much as 50%. This has resulted in a decrease in river depth by 10%. The observed temporal variability is related to the decreasing concentration of suspended sediment resulting from a change in soils occupation. Cultural activities had significant importance at the beginning of this century in the Warche river basin. Crop lands have however been replaced by forest and prairies.

Zusammenfassung. *Analyse der raum-zeitlichen morphologischen Schwankungen im Gerinnebett der Warche stromaufwärts des Bütgenbachdammes (Belgien).* – In diesem Artikel werden die Ergebnisse einer raum-zeitlichen Studie über die morphologischen Schwankungen des Flusses Warche stromaufwärts des Bütgenbach Dammes in den belgischen Ardennen vorgestellt. Die stromabwärtigen Schwankungen wurden bereits 1966 vom belgischen Landwirtschaftsministerium mit Hilfe von 153 Messungen der Flusstiefe und -breite erfasst. Ein signifikanter Wechsel der Flusstiefe und zwei Änderungen der Flussbreite konnten in diesem Abschnitt erkannt werden. Die Tiefenänderung ereignete sich stromabwärts des Warche-Tiefenbach-Zusammenflusses und zeigt sich in einem Rückgang um 11% infolge einer Sedimentakkumulation aus lateralerosiven Prozessen. Auch die Querschnittsänderungen fanden an Zusammenflüssen dergestalt statt, dass eine Erweiterung um 32 bis 82% in Richtung stromabwärts zu verzeichnen war. Die Analyse der zeitlichen Schwankungen wurde mittels *t*-Test-Vergleich von Breite und Tiefenmessungen von 1966 und 1996 durchgeführt. Stromabwärts des Warche-Tiefenbach-Zusammenflusses nahm die mittlere Flussbreite um 18% zu. Die Flusstiefe veränderte sich in diesem Zeitraum nicht signifikant. Oberhalb des Warche-Tiefenbach-Zusammenflusses ist dagegen ein signifikanter Anstieg der Flussbreite um 50% zu verzeichnen. Dieser Umstand wird durch den ursächlichen Rückgang der mittleren Flusstiefe um 10% begleitet. Die beobachteten Änderungen resultieren hauptsächlich aus dem Rückgang der mitgeführten Suspensionsfracht durch den Landnutzungswandel während des letzten Jahrhunderts vom Ackerbau hin zur Wald- und Grünlandwirtschaft.

1 Introduction

La variation longitudinale de la largeur et de la profondeur des cours d'eau en fonction du débit a fait l'objet de nombreuses études dans le cadre de la théorie de la géométrie hydraulique (FERGUSON 1982). Ces études avaient essentiellement pour but d'établir des relations entre ces variables permettant ainsi de prédire les valeurs de la largeur et de la profondeur à une section donnée de la rivière en fonction du débit mesuré. Ces relations servent également à reconstituer des débits anciens sur la base des formes laissées par les rivières à l'Holocène ou au cours du Quaternaire récent (BRAVARD & PETIT 1997). Cependant, sur des petits cours d'eau, cette approche n'est plus applicable en raison de la difficulté de déterminer avec précision l'endroit où se produit le changement longitudinal de la largeur et de la profondeur. De plus, contrairement aux grandes rivières, la variation longitudinale de la morphologie des petits cours d'eau peut être influencée par la nature de la végétation riveraine (BERGERON & ROY 1982). Cette influence provient notamment du mode et de la densité de l'enracinement des espèces végétales. Par ailleurs, les études sur les impacts morphologiques des confluences ont révélé que, dans certaines rivières, la variation longitudinale de la largeur et de la profondeur en aval des confluences n'était pas conforme à la théorie de la géométrie hydraulique (RHOADS 1987, ROY & ROY 1988).

Rappelons que cette théorie prédit une augmentation concomitante, certes dans des proportions différentes, de la largeur et de la profondeur parallèlement à l'augmentation du débit.

En revanche, la variation temporelle de la profondeur et de la largeur des cours d'eau n'a pas encore fait l'objet de nombreuses études. Les rares travaux existants ont été surtout réalisés en aval des barrages (BRANDT 2000). Dans ces études, la variation temporelle résultait principalement des changements de régime hydrologique et de la charge solide induits par les barrages. D'autres facteurs comme le changement climatique, les mouvements tectoniques ou le changement d'affectation du sol dans un bassin versant (SCHUMM 1977, RISLEY & LAENEN 1994, KUHNLE et al. 1998) peuvent modifier la profondeur et la largeur des cours d'eau dans le temps.

Cet article présente les résultats d'une analyse de la variation longitudinale et temporelle de la morphologie du chenal de la Warche en amont du barrage de Bütgenbach en comparant deux relevés topographiques réalisés en 1966 et en 1996.

2 *Le bassin versant de la Warche*

En amont du barrage de Bütgenbach (fig. 1), la Warche répond au schéma classique des rivières ardennaises à charge caillouteuse: elle coule dans un unique chenal bien individualisé dans la plaine alluviale. Celle-ci, large en moyenne de 40 m, est constituée d'un limon compact de 1 à 2 m d'épaisseur couvrant une couche caillouteuse qui repose elle-même sur un substratum essentiellement schisteux (schistes, phyllades et quartzophyllades). Ce cailloutis est enrobé dans une matrice argileuse provenant de l'altération chimique de la roche en place. Dans le lit mineur, la rivière coule sur un cailloutis hérité de la dernière période froide, le substratum n'y affleurant que très rarement même dans les mouilles les plus profondes. La superficie du bassin versant est de 40 km² et la pente moyenne est de 0.6%. Le plus grand affluent de la Warche est la Holzwarthe, dont la confluence est actuellement noyée par le lac formé en amont du barrage. En amont de cette confluence, deux affluents de taille modeste viennent se jeter dans la Warche: le Tiefenbach (2.9 km²) et le Honsbach (3.8 km²), plus en amont (fig. 1).

Dans le secteur étudié, il n'existe aucune station de jaugeage des débits. Ceux-ci sont mesurés quotidiennement au niveau du barrage de Bütgenbach construit en 1932 pour maintenir le volume des réserves du lac du barrage de Robertville à un niveau le plus élevé en période hivernale. Ce dernier barrage a été construit en 1930 à 7 km en aval du premier (fig. 1). De septembre à avril, on baisse le niveau du lac du barrage de Bütgenbach en lâchant presque quotidiennement 10 m³/s (ASSANI et al. 1999). Le lac de Bütgenbach atteint son niveau maximum en septembre et son niveau minimum en avril. Au cours de ce dernier mois, le lac peut se retirer au-delà de la confluence de la Warche avec la Holzwarthe.

3 *Données et méthodes d'analyse*

3.1 *Source des données*

Pour étudier la variation longitudinale de la largeur et de la profondeur ainsi que celle du rapport de ces deux variables, nous avons utilisé les profils transversaux levés en

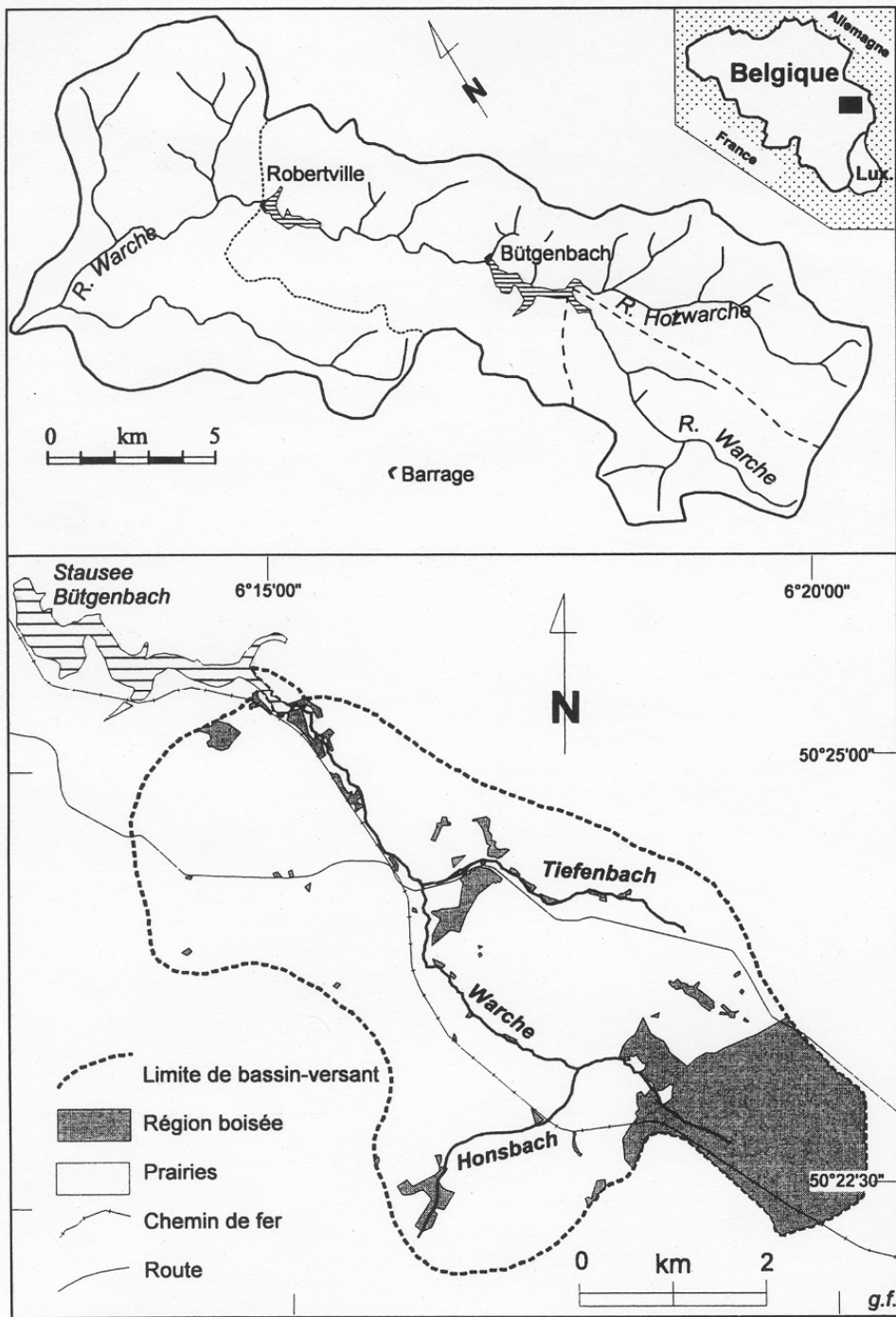


Fig. 1. Le bassin versant de la Warche.

1966 par le Ministère de l'Agriculture belge. Dans le secteur étudié, le Ministère a mesuré 153 profils transversaux. Chaque profil a été dessiné au 1/100, ce qui nous a permis de déterminer avec précision la profondeur moyenne et la largeur à pleins bords du chenal à chaque station de mesure. En ce qui concerne la profondeur moyenne, le nombre de mesures de cote par profil transversal variait en fonction de l'irrégularité du fond du lit. Ainsi, l'intervalle entre deux mesures successives variait entre 0,20 et 1,50 m. La distance entre deux profils transversaux fut cependant quasi constante, c'est-à-dire de l'ordre de 60 m.

Pour analyser la variation temporelle de la morphologie du chenal, nous avons comparé les largeurs et les profondeurs mesurées en 1966 par le Ministère de l'Agriculture belge à celles mesurées en 1996 (ASSANI 1997). Lors de l'échantillonnage de 1996, 110 des 153 profils transversaux de 1966 ont pu être mesurés de nouveau. Les profils ont pu être localisés de manière précise sur le terrain du fait qu'ils étaient représentés sur une carte du tracé en plan du chenal au 1/1.000. Les 41 autres stations n'ont pu être échantillonnées, certaines avaient disparu par recouplement des méandres, alors que d'autres avaient subi des modifications diverses plus ou moins profondes consécutives aux activités anthropiques, de sorte que toute comparaison avec les données de 1966 était devenue très hasardeuse. Nous avons écarté aussi les stations situées au niveau des ponts car ceux-ci entravent l'élargissement naturel du chenal.

Outre les mesures topographiques réalisées en 1966 et en 1996, nous avons analysé aussi les photographies aériennes prises en 1957, 1971 et 1986, afin de suivre l'évolution de la sinuosité du chenal. Elles ont été agrandies à l'échelle de 1/10.000.

Quant à l'affectation du sol, nous disposions des données statistiques relatives aux superficies consacrées aux cultures, aux forêts et aux prairies mesurées par le Ministère de l'Agriculture belge lors des recensements agricoles réalisés en 1929 et en 1995. Dans le bassin versant, nous avons déterminé la superficie occupée par ces différents types d'affectation du sol.

3.2 *Analyse des données*

Pour étudier la variation longitudinale (de l'amont vers l'aval) des variables morphologiques (profondeur et largeur) de la Warche, nous avons utilisé les tests non paramétriques de tendance de Mann-Kendall (SNEYERS 1975) et de Pettitt (PETTITT 1979). Ces deux tests sont abondamment utilisés en climatologie et en hydrologie pour étudier la variation temporelle de la moyenne arithmétique d'éléments hydrométéorologiques comme les précipitations, la température ou les débits de rivières. Ils permettent d'identifier dans les séries les points de changements significatifs de leurs moyennes arithmétiques, changements interprétés comme le signe d'une modification du climat ou du régime hydrologique. Ce changement de la moyenne peut être brusque ou graduel. Dans le premier cas, la date de changement définie par le test de Pettitt correspond à la date exacte du changement de la moyenne. Dans le second cas, cette date permet de déterminer la période approximative pendant laquelle le changement de la moyenne s'est produit. Par analogie, dans une série spatiale, ce changement peut se produire à un endroit précis (changement brusque de la moyenne) ou dans une zone ou section donnée (changement graduel de la moyenne). Dans le cadre de cette étude, nous appliquons les deux tests pour étudier

la variation longitudinale des moyennes arithmétiques de la largeur et de la profondeur. Les changements longitudinaux des moyennes arithmétiques de la largeur et de la profondeur seront interprétés à la lumière des caractéristiques du bassin versant. Seules les données mesurées en 1966 ont été analysées car l'intervalle entre deux profils transversaux fut quasi constant (60 m). En outre, le nombre élevé de stations de mesure (153) garantissait l'application du test de Pettitt dont les seuils critiques approximatifs, fondés sur l'expression asymptotique de la distribution de Kolmogorov-Smirnov, sont mal adaptés à de petits échantillons (VANITSEM & DEMARÉE 1991).

Pour étudier la variation temporelle de la morphologie du chenal, nous avons comparé dans un premier temps les moyennes arithmétiques de la largeur à pleins bords mesurées en 1966 et en 1996 et, dans un deuxième temps, les moyennes arithmétiques de la profondeur à pleins bords mesurées en 1966 et 1996. Les comparaisons ont été faites au moyen du test *t* de Student.

Nous avons aussi analysé la variation spatiale et temporelle du rapport largeur/profondeur au moyen de mêmes tests statistiques. Cependant, nous ne présentons pas ces résultats car ils n'apportent aucune information supplémentaire à ceux obtenus par l'analyse de la largeur et de la profondeur.

4 Résultats

4.1 Variation spatio-temporelle de la largeur

La figure 2 a présente la variation longitudinale de la largeur du chenal à pleins bords en amont du barrage mesurée aux 153 stations en 1966. Celle-ci montre clairement que la largeur augmente de l'amont vers l'aval. Cet accroissement de la largeur du chenal est attesté par le test de Mann-Kendall. Ce test révèle que la courbe directe $U(t)$ et la courbe rétrograde $U^*(t)$ se recoupent en un seul point et que les deux courbes excèdent les valeurs de 1.96 et -1.96, valeurs qui constituent les seuils de signification du test au niveau de probabilité de 5 % (fig. 2 b). Ce résultat nous autorise à conclure avec certitude que la largeur du chenal de la Warche en amont du barrage augmente de manière significative de l'amont vers l'aval.

Pour situer avec exactitude l'endroit où se produit le changement de la moyenne arithmétique de la largeur, nous avons utilisé le test de Pettitt dont le résultat est présenté à la fig. 2 c. Il ressort de cette figure que le changement de la moyenne est hautement significatif au seuil de 1 %. La station de changement correspond au point d'inflexion de la courbe. Nous pouvons donc subdiviser la série des mesures de la largeur du chenal en deux sous-séries: la première (sous-série A) est constituée des 81 premières stations et la seconde (sous-série B) par les 71 dernières stations. Comme nous l'avons précédemment dit, le test de Pettitt ne peut déterminer qu'un seul et unique changement de la moyenne d'une série. Pour déceler d'autres changements éventuels de la largeur moyenne, nous avons analysé séparément les deux sous-séries en appliquant les deux tests. Ils ont révélé que seule la sous-série A présentait un changement significatif de la moyenne. Elle peut donc être subdivisée à son tour en deux sous-séries: la sous-série (A') constituée par les 29 premières stations de mesures et la sous-série (A'') de 51 dernières stations de la sous-série A (de la 31^{ème} à la 81^{ème} station).

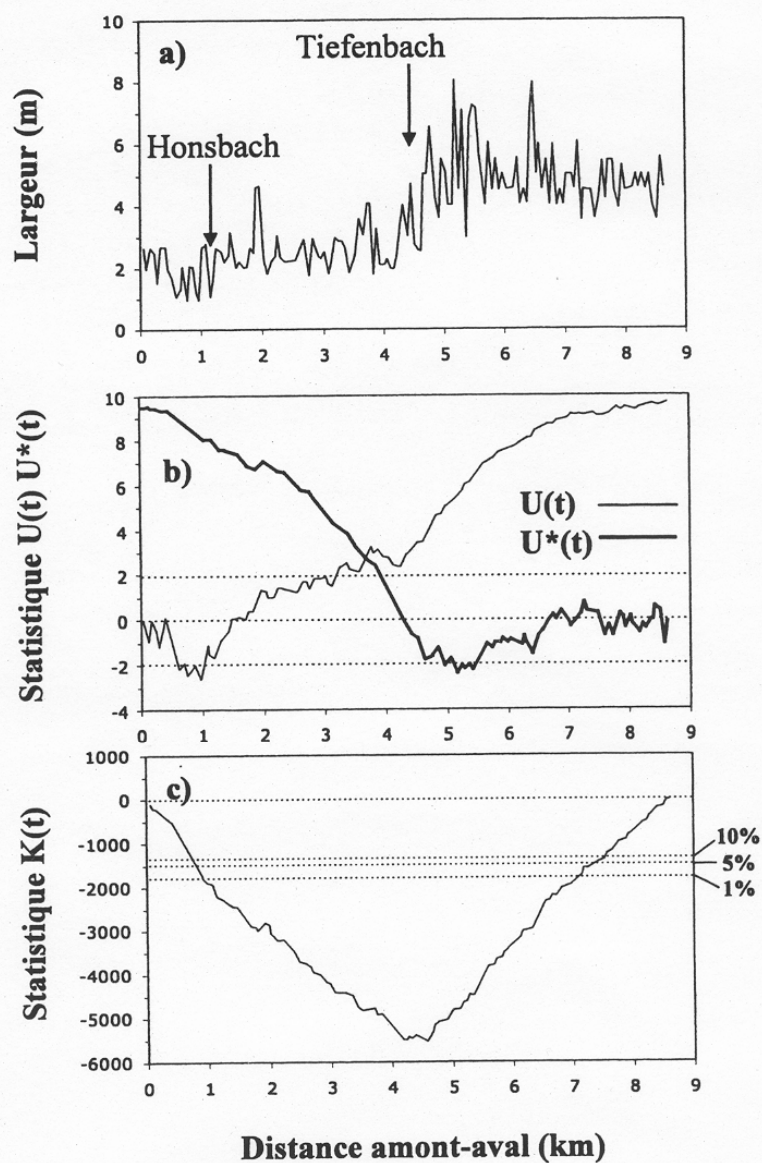


Fig. 2. Variation longitudinale de la largeur de la Warche (a) et application des tests de Mann-kendall (b) et de Pettitt (c).

En amont du barrage, le chenal est caractérisé par deux changements significatifs de la moyenne de la largeur. Ces deux changements permettent de subdiviser le chenal en trois tronçons caractérisés chacun par l'absence de tout changement significatif de la largeur moyenne (population homogène de largeur). Ceci nous permet donc de calculer le taux d'accroissement longitudinal de la largeur moyenne du chenal en amont du barrage de Bütgenbach (tab. 1 a). Il ressort de ce tableau que l'accroissement

Tableau 1 a Variation longitudinale de la largeur moyenne de la Warche en amont du barrage de Bütgenbach en 1966. Les trois tronçons ont été délimités en fonction des changements significatifs de la moyenne des mesures de la largeur au moyen du test de Pettitt.

Tronçons	Largeur moyenne (m)	Écart-type (m)	Taux d'accroissement (%)
1	2.0 (29)	0.62	
2	2.7 (52)	0.74	32.0
3	4.9 (72)	1.05	81.7
Chenal entier	3.6	1.55	

() nombre de stations de mesures.

Tableau 1 b Comparaison de la largeur moyenne dans les trois tronçons de la Warche en amont du barrage de Bütgenbach.

Tronçons	N	1966		1996		t
		X (m)	S (m)	X (m)	S (m)	
1	22	1.86	0.62	3.68	0.78	8.368*
2	38	2.40	0.44	3.80	0.84	8.980*
3	49	4.82	0.89	5.72	1.14	4.310*

X = largeur moyenne à pleins bords; S = écart type; N = nombre des mesures; t: valeur du test t de Student; * = significatif au seuil de 1 %.

de la largeur moyenne est plus important dans le troisième (82 %) que dans le second (32 %) tronçon. Donc, la rivière s'est élargie brusquement dans le troisième tronçon.

Pour expliquer cet élargissement, nous avons localisé sur le tracé de la rivière les deux stations correspondant aux changements significatifs de la largeur moyenne mis en évidence par le test de Pettitt (fig. 3). Ces changements sont situés en aval des confluences des deux principaux affluents. Le premier changement significatif est situé à environ 500 m en aval de la confluence du Honsbach et le second à environ 40 m en aval de la confluence du Tiefenbach. Nous pouvons donc attribuer ce changement de la moyenne de la largeur du chenal en aval de ces deux confluences à l'augmentation du débit liquide apporté par les affluents.

En ce qui concerne la variation temporelle de la largeur, au moyen du test t de Student, nous avons comparé les valeurs de la largeur moyenne mesurées en 1966 à celles mesurées en 1996 dans les trois tronçons définis par les changements significatifs de la moyenne arithmétique de la largeur révélés à l'aide du test de Pettitt. Les résultats du test sont consignés dans le tab. 1 b. Il ressort de ce tableau que la largeur moyenne a augmenté dans le temps dans les trois tronçons du chenal en amont du barrage de Bütgenbach. Les différences des moyennes observées sont, en effet, statistiquement significatives au seuil de 5 %. Cependant, cet accroissement n'est pas uni-

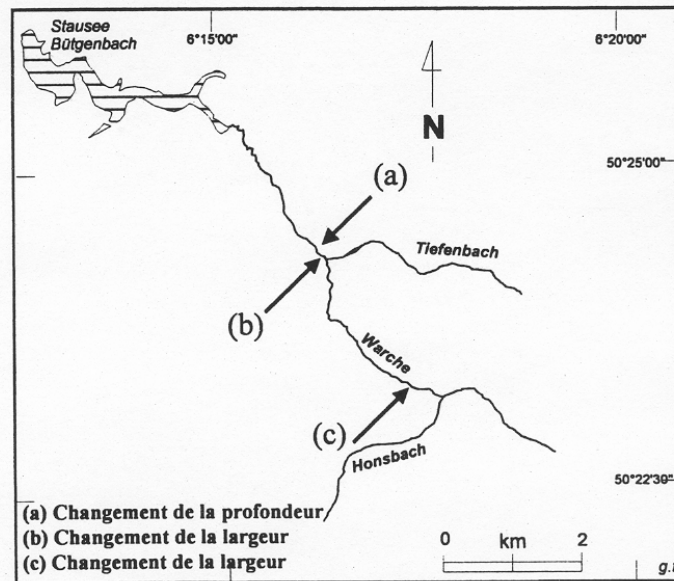


Fig. 3. Localisation des points de changement de la largeur et de la profondeur moyennes du chenal de la Warche.

forme sur tous les tronçons. Il est plus important dans les deux premiers tronçons, situés en amont de la confluence de la Warche avec le Tiefenbach, que dans le dernier tronçon situé en aval de cette même confluence. Dans le premier tronçon, la largeur moyenne a presque doublé. Dans le second tronçon, le taux d'accroissement en 30 ans (1966–1996) est d'environ 60 %. En revanche, ce taux ne dépasse pas 20 % dans le dernier tronçon.

Après avoir confronté plusieurs facteurs (présence du barrage de Butgenbach, hausse des débits liquides et /ou solides, mouvements tectoniques, etc.) susceptibles d'expliquer l'accroissement de la largeur dans le temps, il est apparu que la diminution de la charge en suspension dans le bassin versant est le seul facteur qui explique cet élargissement du chenal de la Warche en amont du barrage. En effet, SCHUMM (1977) a montré que la diminution de la charge en suspension (pourcentage en silt-argile) provoque un élargissement des chenaux des cours d'eau car la sédimentation des particules fines dans le chenal (surtout au niveau des rives convexes) et dans la plaine alluviale ne parvient plus à compenser l'érosion des berges. Dans le cas de la Warche, cette diminution de la charge en suspension au fil des ans résulterait de l'abandon des cultures au détriment des prairies et des techniques agricoles (essartage des sols) qui favorisaient jadis l'érosion des sols. L'analyse de l'évolution d'affectation du sol dans la commune de Bullange, dans laquelle est circonscrite le bassin versant de la Warche en amont du barrage de Butgenbach, révèle que les surfaces réservées aux cultures ont significativement diminué (tab. 3). Elles ont été progressivement remplacées par les prairies permanentes et les forêts. Cette substitution a réduit de manière significative la charge en suspension en protégeant mieux les sols. Par ail-

leurs, il est prouvé que dans les siècles passés, les rivières ardennaises ont connu une importante sédimentation limoneuse en raison de la mise en culture et du déboisement des versants (HERONTAY 1973). En se fondant sur les marqueurs stratigraphiques comme les scories provenant de l'industrie métallurgique installée autrefois dans les vallées, cet auteur affirme que, dans certaines de ces vallées, la sédimentation a parfois atteint 2 m en 700 ans (entre le milieu du XIII^{ème} siècle et le milieu du XIX^{ème} siècle), soit en moyenne 3 mm/an. Pourtant, les récentes mesures ont révélé que les rivières ardennaises transportent actuellement très peu de charge en suspension, inférieure à 1 mm/an (PETT 1985, LAMALLE et al. 1989). Toutefois, à la suite d'influences anthropiques, cette charge peut devenir relativement importante (CLOSE-LECOCQ et al. 1982) confirmant ainsi le fait que la réduction de celle-ci observée actuellement dans les rivières résulterait de changement d'affectation des sols dans les bassins versants ardennais. Un autre fait qui était la thèse de la diminution significative de la charge en suspension dans le bassin versant est l'absence de toute trace de remblaiement dans le lac du barrage. Ainsi, le chenal de la Warche noyé périodiquement par les eaux du lac n'est pas du tout colmaté (ASSANI 1997). Aucune accumulation ne s'est jamais édiflée en amont du lac de barrage comme on pouvait s'y attendre. Il est probable que l'élargissement du chenal de la Warche aurait débuté avant même la construction du barrage car le changement d'affectation du sol remonte au début du 20^{ème} siècle.

Le taux d'élargissement élevé observé en amont de la confluence de la Warche avec le Tiefenbach s'explique en partie par la présence de longs secteurs rectilignes où l'érosion affecte les deux berges. En revanche, dans le secteur sinueux développé en aval de cette confluence, l'érosion n'affecte qu'une seule berge (rive concave).

4.1.2 *Variation spatio-temporelle de la profondeur*

En ce qui concerne la variation longitudinale de la profondeur, le test de Mann-Kendall n'a mis en évidence aucun changement significatif de la moyenne. En fait, les courbes directe et rétrograde se sont recoupées en plusieurs points. En revanche, le test de Pettitt a révélé l'existence d'un changement significatif de la moyenne de la profondeur du chenal. Cependant, ce changement n'est significatif qu'au seuil de 10%. Il a été confirmé par le test paramétrique *t* de Student. Ce changement se traduit par une diminution de la profondeur moyenne du chenal de l'amont vers l'aval. Le point de changement est situé à environ 500 m en aval de la confluence de la Warche avec le Tiefenbach (fig. 3). L'analyse séparée des deux sous-séries au moyen des mêmes tests n'a pas pu détecter un autre changement significatif de la profondeur. Donc, contrairement à la largeur, la profondeur moyenne à pleins bords de la Warche en amont du barrage de Bütgenbach est caractérisée par un seul changement de la moyenne arithmétique. Le taux de diminution longitudinal de cette moyenne est de 11% (tab. 2 b). Le tronçon, situé en aval de la confluence avec le Tiefenbach, est ainsi caractérisé par une augmentation importante de la largeur mais une diminution de la profondeur. Cette diminution résulterait de l'accumulation des sédiments provenant de l'érosion des berges à l'origine de l'élargissement. Cette évolution de la profondeur n'est pas conforme à la théorie de la géométrie hydraulique. En revanche, elle est en accord avec les observations faites sur les impacts morphologiques des confluences (ROY & ROY 1988).

Tableau 2 a Variation longitudinale de la profondeur moyenne de la Warche en 1966 en amont du barrage de Bütgenbach. Les tronçons ont été délimités au moyen du test de Pettitt.

Tronçons (m)	Profondeur moyenne (m)	Écart-type	Taux de diminution (%)
1	0.87 (89)	0.26	
2	0.77 (64)	0.24	11.4
Chenal entier	0.83 (153)	0.25	

() nombre de stations de mesures.

Tableau 2 b Comparaison de la profondeur moyenne dans les deux tronçons de la Warche en amont du barrage de Bütgenbach.

Tronçons	N	1966		1996		t
		X (m)	S (m)	X (m)	S (m)	
1	60	0.87	0.24	0.79	0.16	2.326*
2	48	0.83	0.24	0.88	0.19	1.067

X = profondeur moyenne à pleins bords; S = écart type; N = nombre des mesures; t = valeur du test de t de Student; * = significatif au seuil de 5%.

Quant à la variation temporelle de la profondeur, nous avons comparé, au moyen du test t de Student, les valeurs de la profondeur mesurées en 1966 et en 1996 en amont et en aval de la confluence de la Warche avec le Tiefenbach. Les résultats de cette comparaison sont consignés dans le tabl. 2 b. Dans le premier tronçon situé en amont de la confluence, la profondeur moyenne du chenal a diminué de manière significative. Cette diminution est de l'ordre de 10% en 30 ans. Cet exhaussement du lit résulte sans nul doute de l'accumulation des matériaux provenant de l'élargissement du chenal que nous avons mis en évidence dans ce tronçon (tabl. 1 b). Dans le second tronçon situé en aval de la confluence, la variation de la profondeur moyenne n'est pas statistiquement significative malgré une tendance à l'exhaussement du lit qui est observée. Cette absence de variation de profondeur moyenne est due au fait que l'élargissement du chenal fut modéré durant ces 30 dernières années (tabl. 1 b). Le volume des matériaux provenant de l'érosion des berges est ainsi insuffisant pour provoquer un exhaussement significatif du chenal dans ce tronçon.

4.2.3 Évolution du tracé de la Warche

La fig. 4 compare le tracé de la rivière en 1966 et en 1996. Le tracé se caractérise par une alternance des tronçons rectilignes et des tronçons sinueux. La sinuosité est surtout développée en aval de la confluence de la Warche avec le Tiefenbach. Durant ces

Tableau 3 Évolution de la superficie (en ha) des cultures, des forêts et des prairies dans la commune du Bullange dans laquelle est circonscrite une grande partie du bassin versant de la Warche en amont du barrage de Bütgenbach.

Type d'affectation du sol	Superficie en 1929 (%)	Superficie en 1995 (%)
Cultures	73.2	0.3
Forêts	12.7	55.3
Prairies	14.1	44.4

Source: Institut belge des statistiques (1996).

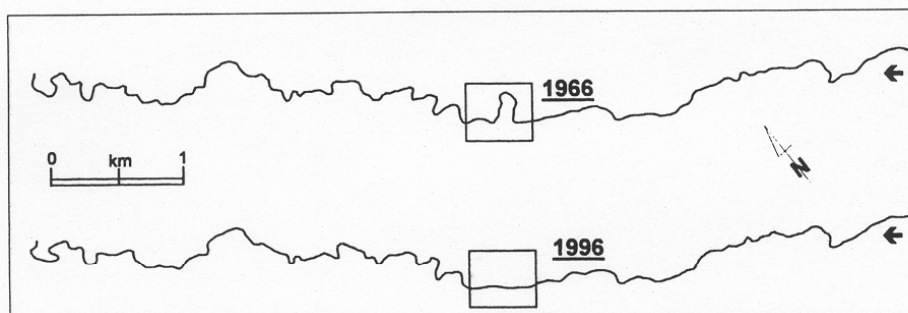


Fig. 4. Comparaison du tracé du chenal de la Warche en 1966 et en 1996.

30 dernières années, la rivière n'a perdu que 475 m de son cours à la suite du recouplement d'un train des méandres. Ce recouplement a été réalisé par l'homme pour faciliter la construction d'une usine de laiterie. La rivière y a été ainsi canalisée par l'élévation de la hauteur des berges afin de protéger l'usine des inondations. Il ne subsiste donc plus de trace des méandres recoupés dans la plaine alluviale (ASSANI 1997). Notons que cette rectification du lit de la Warche n'a provoqué aucun changement significatif de la morphologie du chenal.

6 Conclusion

Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé la variation spatiale et temporelle des variables morphologiques (largeur et profondeur à pleins bords et la sinuosité) de la Warche en amont du barrage de Bütgenbach au moyen des tests statistiques (test de Mann-kendall, de Pettitt et de Student). En ce qui concerne la variation longitudinale (spatiale) des variables morphologiques, l'application des tests de tendance de Mann-Kendall et de Pettitt sur 153 mesures de largeur et de profondeur effectuées en 1966 a conduit aux résultats suivants:

(1) La variation longitudinale de la largeur est caractérisée par deux changements significatifs de la moyenne arithmétique. Les deux changements surviennent

en aval des confluences de deux principaux affluents, à savoir le Honsbach et le Tiefenbach. Ces changements résultent de l'augmentation du débit liquide apporté par ces affluents.

(2) La variation longitudinale de la profondeur est caractérisée par un seul changement de la moyenne survenue en aval de la confluence du second affluent. Ce changement correspond à une diminution de la profondeur moyenne du lit consécutive à l'accumulation des matériaux provenant de l'érosion latérale. Cependant, cette accumulation paraît de faible ampleur. La construction du barrage n'a donc pas provoqué une sédimentation importante dans le chenal en amont, ce qui explique l'absence d'édification d'un cône de déjection à l'entrée du lac du barrage.

Quant à la variation temporelle, la comparaison, à l'aide du test *t* de Student, des mesures effectuées en 1966 et 1996, a mis en évidence les faits suivants:

(3) Une augmentation significative de la largeur moyenne du chenal en amont du barrage. Cette augmentation a été importante en amont de la confluence du Tiefenbach dans les 30 dernières années (1966–1996). Cet élargissement du chenal serait consécutif à la réduction de la charge en suspension provoquée par le reboisement et la substitution aux cultures des prairies permanentes.

(4) Une diminution de la profondeur moyenne dans le secteur en amont de la confluence de la Warche avec le Tiefenbach en raison de l'érosion latérale active dans ce tronçon durant les 30 dernières années. Dans le tronçon en aval de cette confluence, aucun changement significatif de la profondeur moyenne ne fut observé pendant cette même période en raison de la faible érosion latérale qui s'y était produite.

(5) Depuis la construction du barrage en 1932, la sinuosité du chenal n'a guère changé – si on ne tient pas compte des recoupements des méandres d'origine anthropique – du fait que la sédimentation dans le chenal est relativement faible et n'a pas modifié la fréquence du débit à pleins bords.

Cette étude n'a pas mis en évidence une quelconque influence du barrage de Bütgenbach sur la variation spatio-temporelle de la morphologie de la Warche en amont de cet ouvrage. Donc, l'évolution morphologique de la Warche en amont de ce barrage ne répond pas au schéma classique proposé par Xu (1990) en raison de la réduction de la charge en suspension.

Enfin, cette étude veut surtout attirer l'attention sur le fait qu'en augmentant les superficies mises en jachères dans des pays de la communauté européenne, on court le risque de provoquer une réduction significative de la charge en suspension dans les rivières. Cette réduction peut engendrer à plus ou moins long terme des modifications de la dynamique et de la morphologie des cours d'eau. Ces modifications peuvent se traduire notamment par l'élargissement des lits et éventuellement par leur exhaussement en fonction de l'ampleur de l'érosion latérale qui résulterait de cette diminution de la charge en suspension.

Remerciements

Les résultats de cette note sont tirés de la thèse de doctorat présentée à l'Université de Liège par le premier auteur. Les auteurs remercient A. Pissart de l'université de Liège pour ses précieux conseils. Les analyses statistiques ont été réalisées au laboratoire d'hydrologie de l'Institut royal météorologique belge dirigé par le Dr G. Dema-

rée à qui nous adressons aussi nos remerciements. Les auteurs remercient le MET-SETHY (Ministère de l'Équipement et des Transports ainsi que le Service d'Études hydrologiques) et le SCENN (Service des Cours d'Eau non navigable) et l'ELECTRABEL (gestionnaire du barrage de Bütgenbach) d'avoir mis à leur disposition un nombre considérable de données. L'Administration générale de la coopération belge au développement a accordé son appui financier.

Références

- ASSANI, A. A. (1997): Recherche d'impacts d'une retenue sur le comportement d'une rivière ardennaise (hydrologie, sédimentologie, morphologie et végétation). Cas du barrage de Bütgenbach sur la Warche (Belgique). – Th. Doc. Sc. Géogr., Univ. de Liège, 482 p.
- ASSANI, A. A., PETIT, F. & MABILLE, G. (1999): Analyse des débits de la Warche aux barrages de Bütgenbach et de Robertville (Ardenne belge). – Bull. Soc. Géogr. Liège. 36: 17–30.
- BRANDT, S. A. (2000): Classification of geomorphological effects downstream of dams. – *Catena* 40: 375–401.
- BRAVARD, J. P. & PETIT, F. (1997): Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial. – Armand Colin, Paris, 222 pp.
- BERGERON, N. & ROY, A. G. (1985): Le rôle de la végétation sur la morphologie d'un petit cours d'eau. – *Géogr. Phys. Quater.* 39: 117–146.
- CLOSE-LECOQCQ, J. F., PISSART, A. & KOCH, G. (1982): Les transports en suspension et en solution de la Meuse à Liège et Taiffer. – Bull. Soc. Géogr. Liège. 18: 5–18.
- FERGUSON, R. I. (1982): Hydraulics and hydraulic geometry. – *Progr. Phys. Geogr.* 1–31.
- HENROTTAY, J. (1973): La sédimentation de quelques rivières belges au cours des sept derniers siècles. – Bull. Soc. Géogr. Liège. 9: 101–115.
- KUHNE, R. A., BINGER, R. L., FOSTER, G. R. & GRISSINGER, E. G. (1998): Land use changes and sediment transport in Goodwin Creek. – In: KINGEMAN, P. C., BESCHTA, R. L., HOMAN, P. D. & BRADLEY, J. B. (eds.) (1998): Gravel-bed rivers in the environment: 279–292; Water Resources Publications.
- LAMALLE, C., PETIT, F., KOCH, G., HURGTEN, C. & PISSART, A. (1989): Les transports en suspension et en solution dans la Burdinale, affluent principal de la Meuse. – Bull. Soc. Géogr. Liège. 25: 39–51.
- PETIT, F. (1985): L'évolution de la charge en suspension d'une rivière ardennaise au cours de périodes de crue. – Bull. Soc. Géogr. Liège. 21: 97–104.
- PETTITT, A. N. (1979): A non-parametric approach to the change-point problem. – *Appl. Statist.* 28: 126–135.
- RISLEY, J. C. & LAENEN, A. (1994): Simulating effects of timber harvesting on streamflow in the Oregon Coast Range using watershed modeling. – In: MARSTON, R. A. & HASFURTHNER, V. R. (eds.) (1994): Effects of Human-Induced Changes on Hydrologic Systems: 245–254; AWRA annual summer symp. American Water Res. Ass.
- RHOADS, B. L. (1987): Changes in stream channel characteristics at tributary junctions. – *Phys. Geogr.* 8: 346–361.
- ROY, A. G. & ROY, R. (1988): Changes in channel size at river confluences with coarse bed material. – *Earth Surf. Proc. Landf.* 13: 77–84.
- STARKE, L. (1983): The reflection of hydrologic changes in the fluvial environments of the temperature zone during the last 15.000 years. – In: GREGORY, K. J. (ed.) (1983): Background to palaeohydrology: 213–235; Wiley & Sons.
- SCHUMM, S. A. (1977): The fluvial system. – Wiley & Sons, New York, 338 pp.
- SNEYERS, R. (1975): Sur l'analyse statistique des séries d'observations. – O. M. M., note technique, n°143, Genève, 192 pp.

- VANITSEM, S. & DEMAREE, G. (1991). Détection et modélisation des sécheresses au Sahel. – ORSTOM, Cah. Hydrol. Cont. 2: 155–171.
- XU, J. (1990): Complex response in the adjustment of the Weihe River channel to the construction of the Sanmenxia Reservoir. – Z. Geomorph. N. F. 34: 233–345.

Adresses des auteurs: ALI A. ASSANI, Section de géographie, Université du Québec à Trois-Rivières, Pavillon Léon-Provencher, 3351, boul. des Forges, Trois-Rivières (Québec) G9A 5H7, Canada. e-mail: Ali_Assani@uqtr.ca. – FRANÇOIS PETIT, Département de Géographie Physique, Institut de Géographie, Université de Liège, Allée du 6 août, 2-Bat. B11, Sart-Tilman, B-4000 Liège, Belgique. – THOMAS BUFFIN-BÉLANGER, Department of Geography, University of Western Ontario, Social Science Centre, London (Ontario), N6A 5C2, Canada. – ANDRÉ G. ROY, Département de géographie, Université de Montréal, C. P. 6128, Succursale Centre-Ville, Montréal (Québec), H3C 3J7, Canada.