

ANALYSE DES DÉBITS DE LA WARCHE AUX BARRAGES DE BUTGENBACH ET DE ROBERTVILLE (ARDENNE BELGE)

Ali Arkamose ASSANI, François PETIT et Georges MABILLE

Résumé

Le dépouillement des données archivées aux barrages de Butgenbach et de Robertville a permis de reconstituer la série des débits naturels de la Warche de 1930 à 1995. Une analyse chronologique des modules annuels révèle qu'il n'y a pas de tendance à une augmentation ou à une diminution de ces derniers, montrant ainsi que l'accroissement des surfaces urbanisées du bassin versant et le changement d'affectation du sol n'ont pas modifié de manière significative l'importance des modules annuels. Une analyse effectuée par une méthode de filtrage montre également que les variations interannuelles des débits correspondent aux grands épisodes de sécheresse et d'excès en eau, mis en évidence dans d'autres rivières ardennaises et, à quelques nuances près, dans d'autres grandes rivières européennes.

L'analyse statistique des crues annuelles maximales mesurées à Robertville montre que la série annuelle des débits journaliers est la mieux décrite par les distributions de Jenkinson et de Weibull III alors que la série des débits maximums instantanés est mieux décrite par la loi de Gumbel. L'analyse des crues maximales montre également que les deux barrages permettent un écrêtement important des crues, atténuant de ce fait la gravité des inondations dans les parties situées en aval.

Mots-clés

série chronologique des débits, modifications du régime hydrologique, régulation des crues, loi de probabilité, Haute Ardenne

Summary

Going through the data processing filed in the Butgenbach and Robertville dams office allowed to recreate the series of the natural discharges of the Warche from 1930 to 1995. A chronological analysis of the mean annual discharge reveals no tendency to an increase or a diminution of this later, showing thus that the increase of urbanized areas of the catchment and the change of land-use have not modified in a significant manner the hydrological regime of the river. An analysis using a filtering method shows that interannual variations of discharges correspond to the main periods of dryness or water excess, revealed in others Ardenne rivers and, with some slight differences, in others main European rivers.

The statistical analysis of the annual maximal floods evaluated at Robertville shows that the annual series of daily discharges is better described by Jenkinson and Weibull III distributions while the series of instantaneous maximum discharges is better described by Gumbel law. Maximal flood analysis also shows that the two dams allow floods attenuation, lessening the damages downstream.

Key-words

discharge long series, hydrological regime modification, floods regulation, law of statistical distribution, High Ardenne

INTRODUCTION

Le barrage de Robertville a été construit dans les années trente en vue de produire de l'hydroélectricité et, deux ans plus tard, le barrage de Butgenbach était mis en service afin de maintenir le volume des réserves du lac de Robertville à son niveau le plus élevé (Fig. 1). Des lâchers sont ainsi effectués régulièrement à partir de Butgenbach.

La série des débits moyens journaliers a été reconstituée aux barrages de Butgenbach et de Robertville sur la période 1930-1995, ce qui présente un grand intérêt dans la mesure où, en Haute Belgique, des séries de débits aussi longues sont relativement rares. Elles existent seulement pour la Semois à la station de Membre ainsi que pour l'Ourthe à la station d'Angleur, stations où des traitements des débits ont été effectués

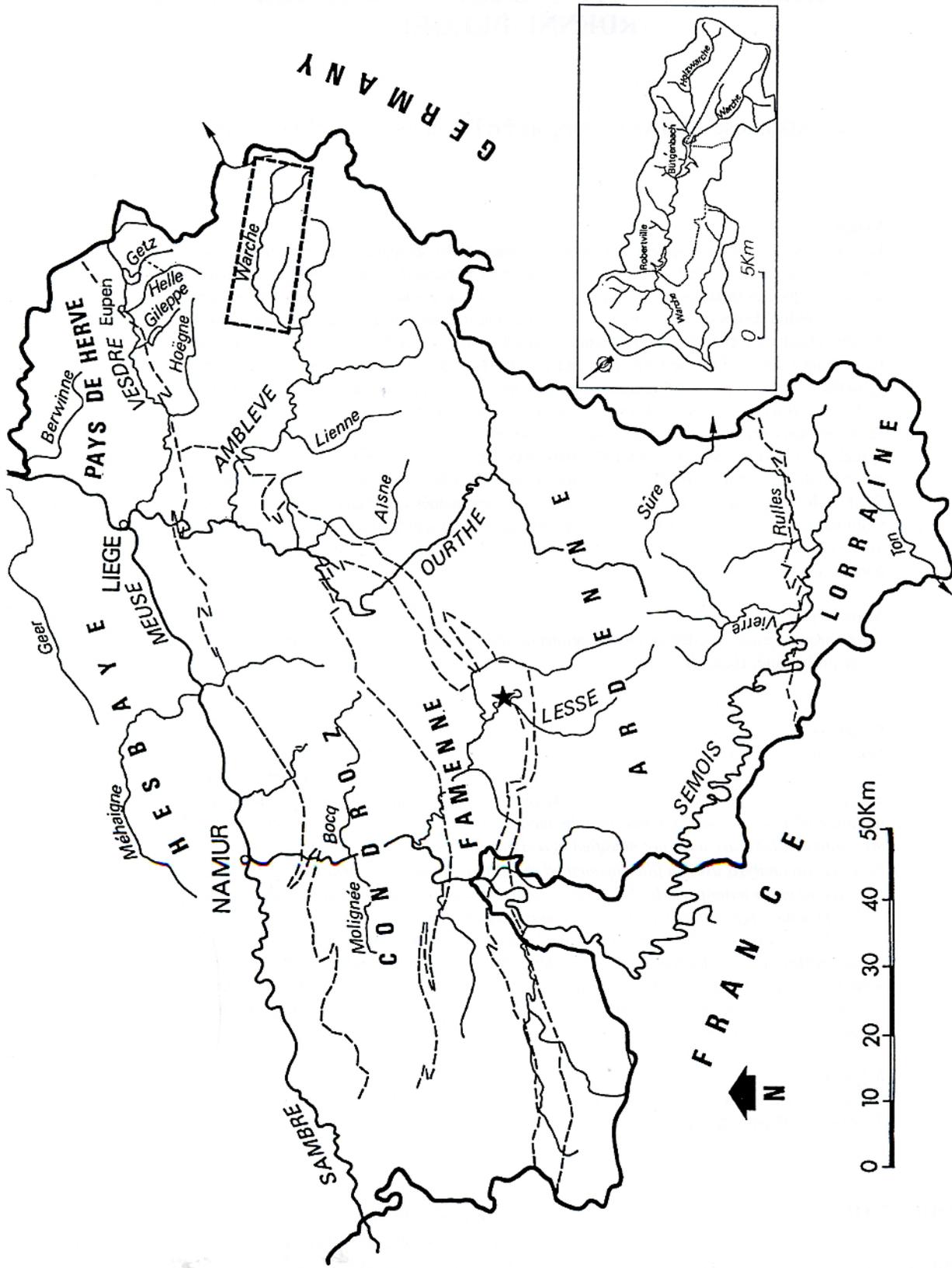


Figure 1 - Carte de localisation des différentes rivières mentionnées dans le texte; l'étoile localise la grotte de Han/lesse; en cartouche, le bassin de la Warchie avec la localisation des barrages.

respectivement par Bultot et Dupriez (1976) et par Bamboneyo (1995). Ces études concernent des bassins hydrographiques de dimension relativement importante (respectivement 1 200 et 3 500 km²). Sur des bassins de plus petite dimension, une seule étude a été réalisée; elle porte sur la Gileppe au cours de la période 1880-1947 (Sporck, 1951).

L'analyse des débits sur une longue période présente un grand intérêt à plus d'un titre. Elle permet tout d'abord de suivre les variations interannuelles du débit et de mettre en évidence une éventuelle tendance à la modification du régime en relation, par exemple, avec des changements de l'affectation du sol, avec un accroissement de l'urbanisation ou avec une éventuelle modification du climat. Il est également utile d'avoir une analyse fine de la récurrence des crues sur des rivières afin d'en faire une estimation qui sera d'autant plus correcte que la période de référence sera longue; il est ainsi possible de proposer des valeurs guides qui peuvent être exploitées dans le cas de rivières où les séries de débits sont trop courtes pour avoir des estimations fiables. Par ailleurs, dans le cas de la Warche, il était intéressant de voir l'impact des barrages sur la modification du régime hydrologique de la rivière et sur l'écrêtement des crues.

I. SITE ET MÉTHODE D'ETUDES

La Warche entaille des roches schisteuses (schistes, phyllades et quartzophyllades) du Dévonien inférieur de l'Ardenne nord-orientale. Au droit des barrages de Butgenbach et de Robertville, les superficies du bassin versant sont respectivement de 80 et 118 km²; la Warche reçoit l'Holzwarche dont la confluence est actuellement noyée par le lac de Butgenbach. Entre les deux barrages, la Warche ne reçoit que des affluents de dimension modeste.

En système naturel, la Warche répond au schéma classique des rivières ardennaises à charge caillouteuse : elle se dessine en un lit mineur bien individualisé au sein d'une plaine alluviale qui représente ici une largeur de l'ordre de 40 m. Le débit à pleins bords de la Warche entre les deux barrages a été estimé à 15 m³.s⁻¹; cette valeur correspond bien à celle mise en évidence dans une relation traitant d'une trentaine de rivières caillouteuses de Haute Belgique. La récurrence du débit à pleins bords pour des rivières de cette dimension est de 0,6 an (Petit et Pauquet, 1997). Le bassin versant est, à l'heure actuelle, essentiellement couvert d'herbages et de forêts mais, comme le notent Christians et Daels (1988), l'importance des herbages dans la partie septentrionale de l'Ardenne date seulement de la fin du XIXe et résulte d'un remplacement des cultures traditionnelles.

Il n'existe pas de station classique de mesure des débits (limnimètre ou limnigraphe) sur la Warche à proximité des barrages de Butgenbach et de Robertville. Ces barrages sont cependant équipés de nombreux dispositifs de mesure qui nous ont permis

de reconstituer la série des débits journaliers.

Le débit en régime hydrologique naturel reconstitué (Q_n) a été évalué de la façon suivante :

$$Q_n = \Delta Q_a + Q_t + Q_c \quad (1)$$

- ΔQ_a est le volume d'eau retenu en une journée dans le réservoir ou prélevé dans ce réservoir; il est connu par la relation $\Delta Q_a = (\Delta S \cdot \Delta h) / t$

où Δh (en m) est la différence de niveau constatée dans le lac pendant la période de temps (t) exprimée en seconde; ΔS (en m²) est l'aire moyenne du lac entre les niveaux correspondant à la période de temps entre deux lectures du niveau du lac. Ce dernier est relevé à heure fixe, généralement une fois par jour, mais, au cours de périodes de crues, l'intervalle de temps entre deux lectures peut varier de 30 minutes à deux heures, suivant la vitesse de montée des eaux. Les lectures se font à un demi-centimètre ou à un centimètre près, suivant l'état d'agitation de la surface du plan d'eau. L'estimation de l'aire moyenne dépend du degré d'exactitude de la courbe des aires. Les courbes de niveau, établies à partir d'un levé topographique, ont été tracées avec une précision de 5 m (ESMA, 1948). Les aires sont donc connues avec précision pour les différentes cotes du plan d'eau. Entre les cotes mentionnées ci-dessus, l'aire du lac est estimée par interpolation; ces valeurs peuvent être considérées comme exactes à 2 ou 3 % près (ESMA, 1948);

- Q_t est le volume d'eau évacué par les turbines pendant le fonctionnement des groupes turboélectrogènes; ces débits sont calculés d'après les abaques qui donnent les coefficients de conversion de l'eau turbinée (c'est-à-dire les quantités d'eau nécessaires à la production d'un kwh) en fonction des cotes du lac et de la marche avec un, deux ou trois groupes de machines;

- Q_c est le débit évacué en période de crues par les vannes de fond, les déversoirs de surface et les siphons. Les données utilisées pour évaluer le volume d'eau évacué par ces appareils sont calculées d'après le degré d'ouverture des vannes et les heures auxquelles des changements ont été apportés à ce degré d'ouverture et d'après la courbe des débits, dressée par le constructeur des vannes, qui donne le débit en fonction du degré d'ouverture des vannes et de la hauteur statique de l'eau en amont du barrage. En ce qui concerne les déversoirs de surface, le barragiste note périodiquement la charge des lames déversantes au-dessus du seuil ou des siphons ainsi que les cotes du lac.

Le dépouillement de l'ensemble de ces données a permis à Assani (1997) de reconstituer la série des débits journaliers depuis octobre 1930 jusqu'en décembre 1988, hormis l'année 1949 et quelques mois en 1950 et en 1970. On dispose cependant des valeurs des débits maximums annuels des débits journaliers au cours de ces années. Après 1988, seules les données permettant de déduire les débits de crues étaient disponibles.

II. TRAITEMENT DES DÉBITS MOYENS ANNUELS

A. Étude chronologique des débits annuels

Plusieurs tests statistiques permettent de déceler une éventuelle tendance dans une série chronologique. Le test de Mann-Kendall, décrit par Sneyers (1975), est le plus couramment utilisé (Laurent et Alexandre, 1977; Demarée, 1990; Bultot et Gellens, 1994) et permet de déterminer la position de sauts brusques dans les séries et le moment où une tendance apparaît. Un exemple d'application a été présenté et largement explicité par Laurent et Alexandre (1977), si bien que seules les grandes étapes de la procédure sont résumées ci-dessous. Le calcul se fait en remplaçant les valeurs de la série par le nombre de valeurs précédentes inférieures à la valeur de l'année. Le total de ces nombres est le t de Kendall. Le test u_t permet de vérifier si la tendance est significative; les valeurs de u_t dépassent alors 1,96 qui représente la valeur de Z au niveau 0,05 pris dans une table de distribution normale. La tendance est croissante ou décroissante suivant le signe de u_t . Pour situer cette évolution dans le temps, il est possible d'effectuer le test u_t progressivement après

chaque année de la période d'observation. On peut également effectuer le test en progressant à rebours, à partir de la fin de la période d'observations (test régressif u_t'). Lorsque l'on porte ces valeurs en graphique, on obtient deux courbes qui se croisent approximativement au moment où a commencé la tendance. L'hypothèse nulle (absence de tendance) est donc rejetée en présence de valeurs élevées de u_t (supérieures à 1,96 ou inférieures à -1,96, au seuil de 5 %) et en cas d'enchevêtrement des deux courbes.

L'application de ce test aux débits annuels de la Warche montre que les deux courbes se recoupent en plusieurs points bien que le seuil de $\pm 1,96$ soit dépassé à plusieurs reprises (Fig. 2). Il s'ensuit donc le rejet de l'hypothèse alternative, c'est-à-dire l'absence d'une tendance positive ou négative. En d'autres termes, le débit moyen annuel n'augmente ni ne diminue dans le temps. Cette stationnarité du régime hydrologique est liée à la stabilité du régime pluviométrique en Belgique (Sneyers et al., 1990); elle traduit en outre le fait que le changement récent d'affectation du sol n'a pas eu de répercussions sensibles sur la variation interannuelle des débits moyens journaliers.

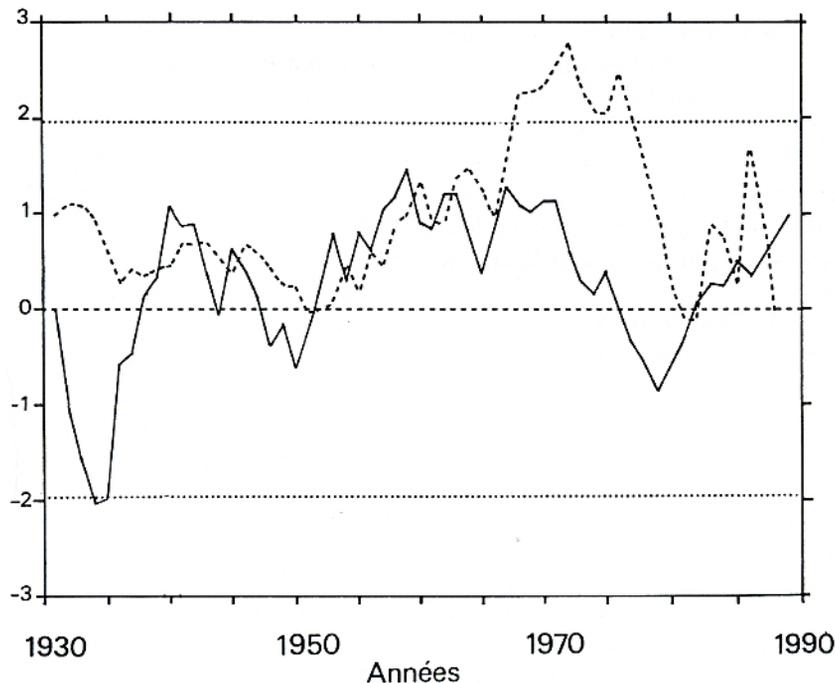


Figure 2 - Test de Mann-Kendall appliqué aux débits moyens annuels de la Warche. Le trait plein représente la série progressive (u_t), le trait interrompu, la série régressive (u_t').

Les composantes cycliques d'une série d'observations peuvent être appréhendées par plusieurs tests (Arléry et al., 1973). Certains se limitent à la mise en évidence du caractère cyclique du phénomène (méthode du corrélogramme), d'autres permettent en outre de définir toutes les composantes cycliques du phénomène (méthode du périodogramme).

La méthode du *corrélogramme* repose sur le calcul de coefficient de corrélation entre les termes de la série décalés chaque fois par un pas de temps (lag) de $k, k+1, k+2...$ On calcule un coefficient d'autocorrélation (r_k) d'ordre k ; la valeur absolue de ce dernier exprime le degré de dépendance affectant les observations distantes de k intervalle de temps. Pour mettre en évidence le caractère cyclique du phénomène étudié, on porte sur un diagramme k en abscisse et r_k en ordonnée. Les points ainsi obtenus dessinent une ligne brisée appelée corrélogramme. Lorsque ce dernier présente une allure oscillatoire qui ne s'amortit pas, c'est-à-dire lorsque l'amplitude se maintient même pour les fortes valeurs de k , on peut conclure à l'existence d'un élément cyclique dans la série (Arléry et al., 1973).

L'analyse périodale (*périodogramme*) permet de rechercher les périodes et amplitudes d'éléments cycliques qui interfèrent dans la série considérée. Soit x une variable représentant une série chronologique; une valeur x_i de la variable peut être la somme de termes de la forme (Arléry et al., 1973) :

$$x_i = A_0 + A_1 \sin(2 \pi i / T_1 + a_1) + A_2 \sin(2 \pi i / T_2 + a_2) + \dots$$

Au moyen de N termes de la série, on peut calculer les quantités suivantes à partir d'une période d'essai T ($T=1, 2, 3, 4...$) :

$$A = (2/n) \sum x_i \cos 2 \pi i / T$$

$$B = (2/n) \sum x_i \sin 2 \pi i / T$$

$$S^2 = A^2 + B^2$$

Le périodogramme est un graphique qui se construit en portant T en abscisse et S^2 en ordonnée. La quantité S^2 passe par un maximum lorsque T est voisin de l'une des périodes réelles $T_1, T_2...$ du mouvement cyclique considéré et il se manifeste alors un sommet marqué sur le graphique (Arléry et al., 1973).

Il ressort de l'analyse du corrélogramme des modules annuels de la Warche (Fig. 3a) qu'aucun coefficient d'autocorrélation n'est significatif au seuil de 5 %; en d'autres termes, les débits annuels sont indépendants les uns des autres. Cette indépendance résulte de l'imperméabilité du substrat dont les aquifères n'influencent pas de manière significative la variation interannuelle des débits. La quantité d'eau stockée au cours d'une année est en effet insuffisante pour influencer le régime des débits de l'année suivante. D'autre part, l'examen du périodogramme (Fig. 3b) révèle l'absence de tout cycle puisque aucun pic significatif n'émerge.

L'application des différents tests présentés ci-dessus révèle que la série des débits annuels de la Warche au cours de la période 1930-1988 possède un caractère aléatoire simple. En d'autres termes, les observations de la série sont issues de la même population et indépendantes les unes des autres. Par ailleurs, l'absence de tendance montre que l'accroissement des surfaces imperméables dans le bassin (routes, urbanisation) ou le changement d'affectation du sol n'a pas affecté de

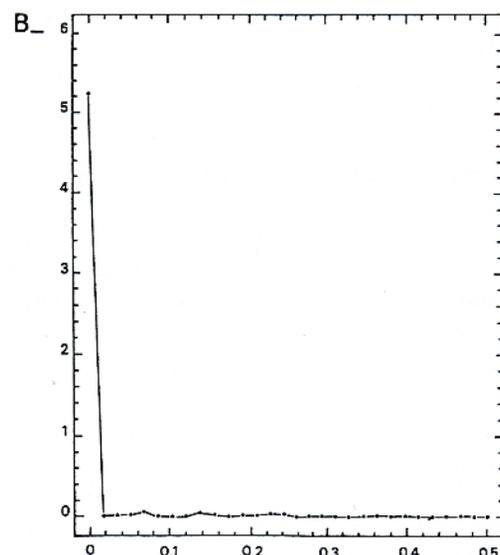
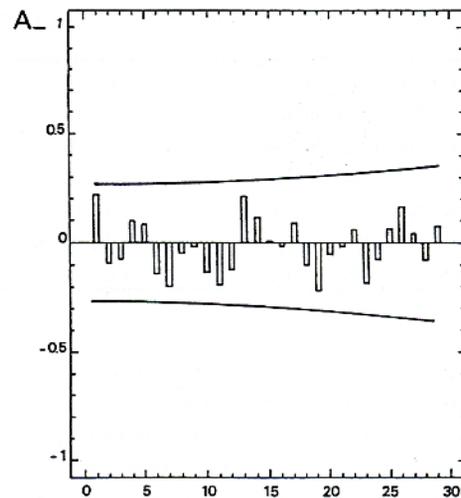


Figure 3 - Corrélogramme (A) et périodogramme (B) des modules annuels de la Warche.

manière significative la variation interannuelle des modules annuels. L'évolution temporelle reste sous la dépendance des facteurs climatiques (et principalement le régime pluviométrique) dont la variation interannuelle reste aléatoire.

Par ailleurs, l'ajustement statistique des modules annuels moyens de la Warche a fait l'objet de différents tests (loi normale, loi lognormale, loi Gamma). Sur la

base des valeurs des χ^2 et de l'écart-type résiduel ainsi que du test des valeurs extrêmes, il s'est avéré que c'est la loi normale qui décrit le mieux la répartition des modules annuels de la Warche, à l'instar d'autres bassins versants du nord de l'Ardenne étudiés par Mbuyu (1988). De cette façon, il a été possible d'avancer des estimations des débits moyens annuels caractéristiques (Tableau 1).

Tableau 1 - Paramètres statistiques de la série des modules annuels de la Warche à Robertville (série 1930-1988) et estimation par la loi normale, de débits moyens annuels caractéristiques

| | | |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| module annuel moyen | 2,60 m ³ .s ⁻¹ | |
| module maximum observé | 4,16 m ³ .s ⁻¹ | récence 100 ans |
| module minimum observé | 1,27 m ³ .s ⁻¹ | récence 30 ans |
| module de récence 5 ans | 3,19 m ³ .s ⁻¹ | |
| module de récence 10 ans | 3,51 m ³ .s ⁻¹ | |
| module de récence 50 ans | 4,08 m ³ .s ⁻¹ | |

Le module annuel moyen, traduit en terme de débit spécifique, représente 22 l.s⁻¹.km⁻², ce qui peut sembler une valeur élevée, mais se justifie dans le contexte hydroclimatique de la Haute Ardenne. En effet, Mbuyu (1988) a travaillé sur les trois rivières qui alimentent le lac d'Eupen, bénéficiant d'assez longues séries des débits moyens journaliers (35 ans), et a mis en évidence des débits spécifiques moyens de 24,8, 25,8 et 26,7 l.s⁻¹.km⁻², respectivement pour la Vesdre, la Getz et la Helle. Ces valeurs sont plus importantes que celles mises en évidence dans les rivières du sud de l'Ardenne (Semois, Rulles, Vierre) qui ont un module spécifique oscillant autour de 20 l.s⁻¹.km⁻² (Petit et Daxhelet, 1989).

B. Analyse des périodes hydroclimatiques

Ce type d'analyse permet de cerner d'éventuelles modifications du régime résultant soit de causes hydroclimatiques, soit de causes anthropiques; il nécessite des séries de mesures particulièrement longues, ce qui limite évidemment son champ d'application. Comme la variable utilisée (le débit moyen annuel) présente des variations interannuelles très larges, il est recommandé d'utiliser un filtre qui permet, outre l'élimination du bruit de fond des variations annuelles, la comparaison entre rivières de taille différente. Différentes méthodes existent, mais un des filtres les plus couramment utilisés (Probst et Tardy, 1985) consiste tout d'abord à calculer les moyennes mobiles (X_j) sur un pas de temps relativement large (cinq ans en général) et ensuite de les pondérer en utilisant une déviation

d/X_m où $d = (X_j - X_m)$ à partir de la valeur interannuelle de la moyenne (X_m).

Cette méthode a été appliquée aux débits de la Warche, mais aussi à ceux d'autres rivières ardennaises, à savoir la Gileppe, la Semois à Membre et l'Ourthe à Angleur (Fig. 4). En ce qui concerne le ruisseau de la Gileppe, on note tout d'abord une phase sèche en 1890-1900 suivie d'une période humide qui schématiquement se poursuit jusqu'en 1930, mais qui culmine entre 1900 et 1910, d'une part, et dans les années vingt, d'autre part. Il s'ensuit une période sèche dans les années trente et un épisode un peu plus humide dans les années quarante. La sécheresse des années trente se retrouve sur la Warche ainsi que la reprise un peu plus humide des années quarante. Par la suite, il s'y individualise un épisode humide dans les années soixante, une sécheresse marquée dans les années septante et une nouvelle période humide dans les années quatre-vingt. On note un bon parallélisme pour la Semois, bien que le pic humide des années quarante y soit nettement plus marqué. On retrouve ainsi, à quelques nuances près, les grandes variations de régimes liées à des causes hydroclimatiques, variations mises en évidence par Probst (1989) dans des grands fleuves européens et qui peuvent être schématisées comme suit : période sèche de 1860 à 1910 avec un petit épisode humide aux alentours des années 1880; période humide de 1910 à 1940 suivie d'une période sèche de 1940 à 1957 avec un épisode plus humide en 1951 et 1952; période modérément humide de 1957 à 1970, suivie de la sécheresse marquée des années septante et enfin retour à une période plus humide à partir de 1979.

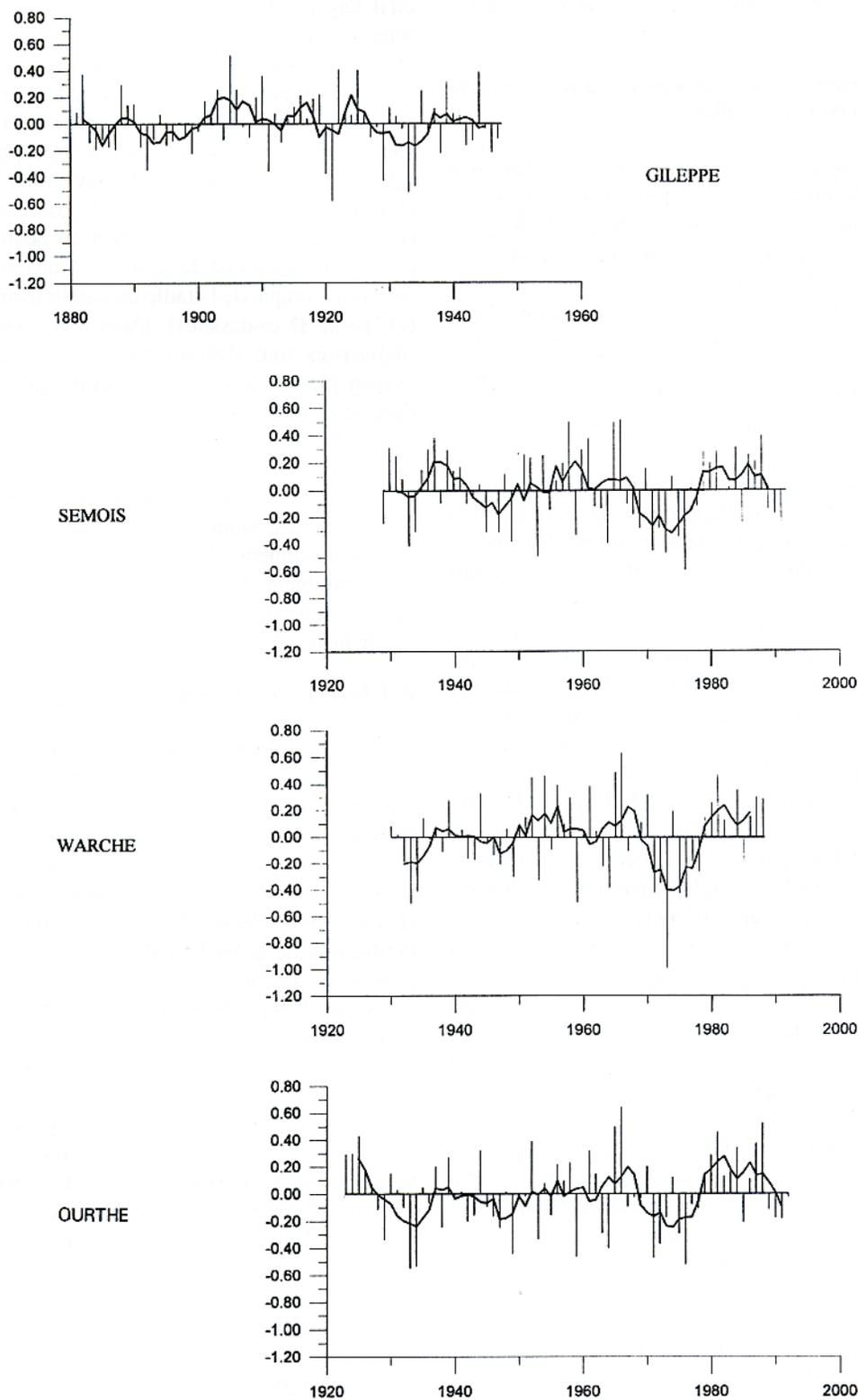


Figure 4 - Variation du module annuel de la Warche, de la Semois, de l'Ourthe et de la Gileppe. Moyenne glissante à pas de 5 ans sur les valeurs filtrées. Débits de la Gileppe sur base des données de Sporck (1947); débits de la Semois à Membre communiqués par le MET-SETHY; débits de l'Ourthe à Angleur sur base des données de Bamboneyo (1995).

III. TRAITEMENT DES CRUES ANNUELLES MAXIMALES

A. Considérations méthodologiques à propos de la constitution de l'échantillon

Il existe plusieurs façons de constituer un échantillon de débits de crue. Une première option consiste à retenir uniquement des valeurs des débits les plus élevés mesurés chaque année; on parle alors de série annuelle. Une autre façon de procéder consiste à retenir tous les débits ayant atteint ou dépassé un seuil fixé par l'opérateur : il s'agit alors de la série partielle des débits. La série annuelle présente plusieurs avantages sur la série partielle :

1. elle est facile à constituer, avec un critère qui ne souffre aucune contestation;
2. elle satisfait aux critères d'application de la théorie des valeurs extrêmes (indépendance de la variable) et peut ainsi être décrite par toutes les lois de distribution généralement utilisées dans le traitement des valeurs extrêmes.

Toutefois, l'utilisation de cette série entraîne une perte d'information du fait que l'on ne prend en compte qu'une seule valeur par an; de plus, elle ne permet pas d'estimer la récurrence de débits inférieurs à une année. Dans ce cas, l'utilisation des séries partielles est inévitable. De plus, la série partielle présente l'avantage d'accroître sensiblement l'importance de l'échantillon, mais se pose le problème du choix du seuil qui doit garantir l'indépendance des débits constituant la série. Il n'existe pas de règles bien précises pour déterminer ce seuil, mais différents tests ont montré qu'une valeur seuil égale à 0,6 fois le débit à pleins bords garantissait l'indépendance des débits tout en fournissant une population plus large, atteignant entre 3 et 7 événements par an (Petit et Pauquet, 1997). D'autre part, Dunne et Leopold (1978) suggèrent de prendre, comme valeur seuil, le débit de la crue annuelle le plus faible de l'ensemble de la série. Enfin, Buishand et Demarée (1989) proposent de prendre en compte les maximums mensuels tout en sachant que l'analyse de la série ainsi constituée est statistiquement très ardue du fait qu'il faut passer par le produit des probabilités (Demarée, com. pers.)

La série partielle est donc particulièrement utile lorsque la série des données est relativement courte, mais également pour déterminer la récurrence d'événements relativement fréquents (récurrence inférieure à 5 ans). Pour ces récurrences relativement faibles, il existe un écart entre les résultats donnés par l'analyse basée sur la série partielle et ceux issus de la série annuelle (Richards 1983; Knighton, 1984; Petit et Pauquet, 1997), mais, pour la détermination d'événements relativement rares, cette différence s'estompe nettement.

Dans la plupart des analyses des débits extrêmes, on utilise le débit moyen journalier, ceci du fait que, dans la plupart des cas, c'est la seule valeur disponible, soit

qu'il s'agisse de valeurs déduites d'un limnimètre et relevées toutes les 24 heures, soit que le mode d'exploitation et de présentation des valeurs horaires soit moyenné au niveau journalier. Pourtant, dans l'utilisation pratique et concrète, on imagine aisément que ce sont les débits de pointe (ou encore appelés débits maximums instantanés) qu'il convient de prendre en considération. Pour résoudre ce problème, Fuller a proposé une formule qui permet de déduire le débit maximum instantané du seul débit moyen journalier, en tenant compte de la taille du bassin hydrographique (cf. point D ci-dessous). Dans notre analyse, nous réaliserons tout d'abord l'ajustement sur le débit moyen journalier, puis nous ferons une critique de l'application de la formule de Fuller à la Warche, car nous sommes en possession d'un certain nombre de débits de crues instantanés. Enfin, nous effectuerons les ajustements avec la série des débits de pointe afin de cerner d'éventuelles différences avec le premier type d'ajustement. Au préalable, il était cependant indispensable d'effectuer une analyse critique concernant le choix de l'ajustement le plus adéquat dans le cas de la Warche.

B. Choix des lois de probabilité à ajuster

Les lois de probabilité proposées pour ajuster les débits de crues sont nombreuses si bien que, dans certains pays, les organismes nationaux chargés de l'exploitation des eaux en sont arrivés à imposer une loi de probabilité pour estimer la récurrence de certains événements rares. Ainsi aux Etats-Unis, l'USWRC (United States Water Research Council) a imposé l'utilisation de la loi Log Pearson III pour décrire la répartition des débits des rivières (Wallis et Wood, 1985). En Grande-Bretagne, le NERC (National Research Council) recommande plutôt l'utilisation de la distribution de Jenkinson (Ahmad et al., 1988). Une enquête de l'OMM (citée par Ferrer, 1992) menée auprès de 55 agences de 28 pays différents a révélé que 52 % des agences utilisent comme lois de distribution la loi de Jenkinson et ses dérivées (Gumbel, Frechet et Weibull), les autres utilisant soit une distribution de Pearson, soit une loi lognormale. En Belgique, aucune loi de probabilité n'est recommandée et il faut ainsi procéder à l'ajustement de plusieurs fonctions de distribution et choisir la meilleure sur base de valeurs du test de χ^2 notamment. Bultot et Dupriez (1976) ont ajusté la loi de Gumbel à la série annuelle des débits moyens journaliers de la Semois mesurés à Membre mais cette distribution surestime très nettement les débits les plus élevés. Ces auteurs ont alors appliqué le procédé de Van der Made qui consiste à subdiviser la série en deux sous-séries (Fig. 5). Selon ces auteurs, la rupture entre ces deux séries s'expliquerait par le débordement généralisé de la rivière lorsqu'elle s'étale dans son champ d'inondation, de telle sorte que la valeur où se présente la rupture, devrait schématiquement correspondre au débit à pleins bords. Comme il apparaît à la figure 5, la déviation des points

dans l'ajustement de Gumbel et la coupure dans l'ajustement de Van der Made se présentent pour un débit de l'ordre de $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ qui correspond à une crue décennale (Bultot et Dupriez, 1976), alors que le débit à pleins bords est estimé à $170 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Petit et Daxhelet, 1989). On peut toutefois considérer que l'écart est peu important, tout d'abord vu l'imprécision

de la valeur du débit à pleins bords qui apparaît en réalité comme un intégrateur sur un tronçon de rivière relativement long. De plus, pour avoir une déviation significative des points, il est clair qu'une masse d'eau appréciable doit être stockée en plaine alluviale, ce qui ne se produit que lors de crues importantes et non pour le débit à pleins bords.

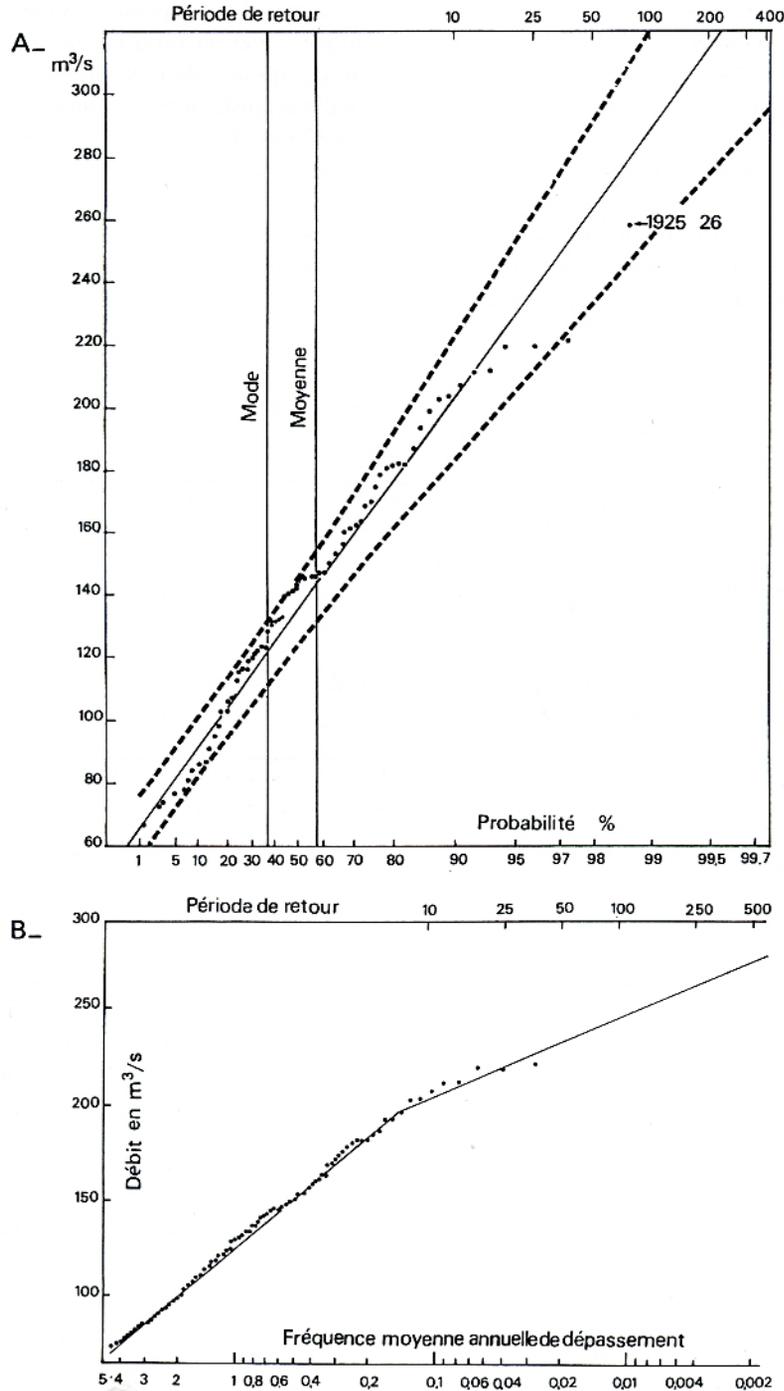


Figure 5 - Ajustement des débits de la Semois dans les distributions de Gumbel (A) et de Van der Made (B) (série 1929-1973); modifié d'après Bultot et Dupriez (1976).

La déviation mise en évidence par Bultot et Dupriez n'est pas observée systématiquement dans toutes les

rivières de Haute Belgique. Ce processus implique, en effet, un vaste champ d'inondation, ce qui est le cas de

la Semois avec la dépression liasique qui longe le front de la première cuesta. Nous avons observé une telle rupture dans le cas de la Lesse (à la station d'Eprave) pour des débits supérieurs à $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (récurrence 6 ans) alors que le débit à pleins bords y est égal à $36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Franchimont, 1994). Dans ce cas également, cette déviation pourrait s'expliquer par la largeur de la plaine alluviale que forme la Lesse à cet endroit, mais aussi par le fait que c'est à partir d'un tel débit que l'ensemble des pertes de la Lesse situées en amont de Han sont saturées (Kaisin et de Pierpont, 1939) et que le méandre abandonné ("la chavée") commence à fonctionner, ce qui doit nécessairement se marquer par un ralentissement de la transmission des crues. Par contre, nous n'avons pas observé ce phénomène dans le cas de l'Amblève, ce qui se comprend dans la mesure où la plaine alluviale de cette rivière est fort restreinte, ni dans le cas de rivières de plus petite dimension, du fait que le stockage en plaine

alluviale y est probablement limité; la plaine alluviale de telles rivières est généralement étroite et présente une pente longitudinale marquée, ce qui doit favoriser la propagation des masses d'eau en lit majeur.

Une analyse comparative du rendement des cinq distributions les plus souvent utilisées a été effectuée par Assani (1997). Elle est basée sur les valeurs des χ^2 et des écarts types résiduels, ceci en traitant la série annuelle des débits moyens journaliers, d'une part, et la série annuelle des débits journaliers instantanés, d'autre part, dont on verra par la suite comment la série a été constituée. Pour la première série des débits, le meilleur ajustement est fourni par la loi de Jenkinson et celle de Weibull III (Tableau 2); l'ajustement de Gumbel reste cependant très performant et présente surtout l'avantage d'être plus facilement mis en oeuvre. Pour la seconde série des débits, c'est incontestablement l'ajustement de Gumbel qui est le plus adéquat (Tableau 3).

Tableau 2 - Valeurs de χ^2 et des écarts types résiduels (S) des lois de probabilité ajustées sur la série annuelle des débits moyens journaliers de la Warche (1930-1991)

| | Gumbel | Logistique | Weibull II | Jenkinson | Loglogistique | Weibull III |
|----------|------------|------------|------------|------------|---------------|-------------|
| χ^2 | 1,856 (2)* | 1,922 (2)* | 0,762 (2)* | 0,803 (1)* | 4,425 (1)* | 0,388 (1)* |
| S | 1,38 | 2,31 | 1,54 | 1,07 | 1,62 | 1,19 |

(1) et (2) = d.d.l; * = significatif au seuil de 5 %.

Tableau 3 - Valeurs de χ^2 et des écarts types résiduels (S) des lois de probabilité ajustées sur la série annuelle des débits instantanés de la Warche (1930-1991)

| | Gumbel | Logistique | Weibull II | Jenkinson | Loglogistique | Weibull III |
|----------|------------|------------|------------|------------|---------------|-------------|
| χ^2 | 1,986 (4)* | 3,654 (4)* | 4,193 (4)* | 7,236 (3)* | 1,736 (3)* | 42,025 (3)* |
| S | 1,41 | 3,42 | 3,17 | 3,38 | 1,84 | 10,51 |

(3) et (4) = d.d.l; * = significatif au seuil de 5 %.

C. Analyse sur la base des débits moyens journaliers de la crue annuelle

Nous avons appliqué la loi de Gumbel pour les raisons invoquées ci-dessus mais aussi pour pouvoir comparer avec d'autres études qui ont fait appel à cet ajustement; il s'agit de l'étude de Mbuyu (1988) déjà évoquée précédemment (35 ans de mesures sur les trois rivières alimentant le lac d'Eupen) et celle d'Elabdellaoui (1993) qui a effectué des analyses de crues sur une vingtaine de rivières de Moyenne et Haute Belgique en vue de proposer une ébauche de typologie régionale des rivières. Les séries d'observations utilisées par ce dernier portent en général sur 15 à 20 années. Les résultats sont exprimés en débits spécifiques de crues, afin de pouvoir comparer des bassins de taille différente, tout en se rappelant que les débits spécifiques de crue sont toujours plus importants dans des bassins de

petite dimension, car il y a un effet d'amortissement lorsque la taille du bassin augmente. Le débit spécifique de la crue décennale de la Warche atteint $329 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, valeur très proche de celle mise en évidence par Elabdellaoui (1993) sur la Hoëgne à Theux ($330 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). Dans les trois rivières des Hautes Fagnes étudiées par Mbuyu (1988), qui drainent des bassins de plus petite dimension (entre 18 et 39 km^2) à très forte pente, la valeur de la crue décennale varie de $510 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ à $670 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. La Liègne, l'Aisne et les rivières du sud de l'Ardenne (Rulles, Sûre et Vierre), pour s'en tenir à des rivières dont la taille du bassin versant reste comparable, ont des valeurs oscillant autour de $220 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Les rivières développées au moins partiellement sur calcaire (Bocq, Molignée, Méhaigne, Ton et Berwinne), caractérisées par un régime de base dominant, ont des valeurs inférieures à $120 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$.

D. Estimation des débits instantanés et adaptation de la formule de Füller

Les débits de pointe (instantanés) sont des débits effectivement mesurés à un instant donné qui nécessitent la présence d'un appareil enregistreur. A partir du dépouillement des données explicité dans la méthodologie, nous avons pu retenir 26 valeurs de débits instantanés de la Warche, pour des crues importantes.

Aussi, afin de reconstituer un catalogue de valeurs plus étoffé, nous avons tout d'abord effectué une régression entre les débits instantanés (Q_p) et les débits moyens journaliers (Q_j). Cette droite a comme expression :

$$Q_p = 1,23 Q_j - 0,91 \quad (2)$$

le coefficient de détermination est de 0,914 et cette droite est hautement significative au seuil de 5 %.

Par ailleurs, nous avons comparé cette droite à la relation empirique mise au point par Füller qui permet d'estimer les débits maximums instantanés à partir des débits moyens journaliers correspondants, dans un bassin versant de taille donnée. Elle a pour expression :

$$Q_p = Q_j (1 + 2,66 / A^{0,3}) \quad (3)$$

où A est la superficie du bassin versant exprimée en km^2 . Pour la Warche dont la surface est de $118 km^2$, l'expression (3) devient $Q_p = 1,64 Q_j$, ce qui donne une droite dont la pente est nettement plus forte que celle de la droite de régression (Fig. 6). Il apparaît donc clairement que la formule de Füller ne convient pas à l'estimation des débits instantanés de la Warche, ce qui rejoint d'ailleurs les constatations de Vereerstraeten (1970) pour la Meuse et de Pauquet (1992) pour l'Ourthe et l'Amblève. Toutefois, si, dans la formule (3) ci-dessus, on remplace l'exposant 0,3 par 0,5 on obtient pour la Warche, la relation $Q_p = 1,24 Q_j$ qui

s'adapte beaucoup mieux à la relation (2) obtenue par régression (Fig. 6).

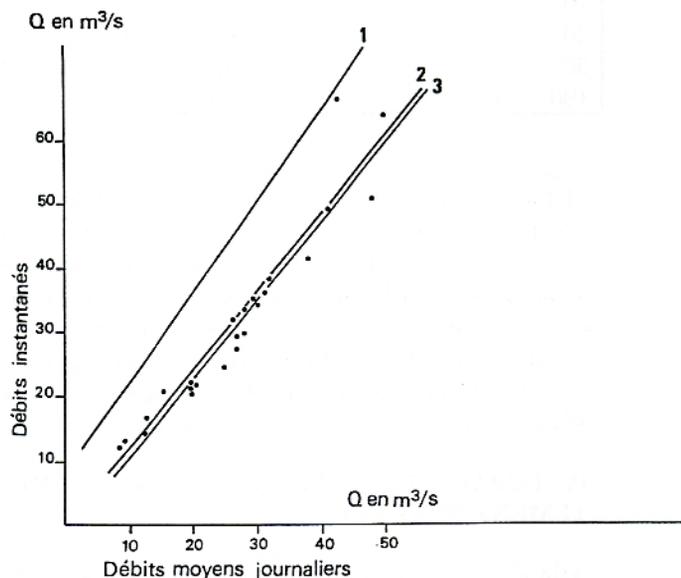


Figure 6 - Relations entre les débits de pointe (Q_p) et les débits journaliers (Q_j). Relation obtenue par régression (courbe 3, équation 2, ci-dessus); formule de Füller (courbe 1, équation 3 ci-dessus) et formule de Füller modifiée (courbe 2, avec l'exposant 0,5).

E. Analyse sur la base des débits de crues instantanés de la Warche

Après avoir reconstitué la série des crues annuelles exprimées en débits instantanés, nous avons estimé des débits de récurrence caractéristique, en utilisant l'ajustement de Gumbel, pour les raisons avancées au point B ci-dessus (Tableau 4).

Tableau 4 - Estimation des débits instantanés de récurrence donnée au moyen de la loi de Gumbel (barrage de Robertville, série 1930-1988)

| Récurrence (en années) | débit en $m^3.s^{-1}$ |
|------------------------|-----------------------|
| 5 | 40,7 |
| 10 | 48,5 |
| 20 | 56,0 |
| 50 | 65,7 |
| 100 | 73,0 |

Nous avons également traduit ces valeurs en débit spécifique afin de les comparer avec celles de quel-

ques rivières de dimension modeste de Haute Belgique (Tableau 5).

Tableau 5 - Débits spécifiques instantanés de récurrence donnée pour des rivières de Haute Belgique (en $l.s^{-1}.km^{-2}$)

| Récurrence en année | Warche | Helle | Vesdre | Getz |
|---------------------|--------|-------|--------|------|
| 10 | 411 | 829 | 869 | 1124 |
| 20 | 475 | 921 | 990 | 1276 |
| 50 | 557 | 1046 | 1149 | 1476 |
| 100 | 619 | 1141 | 1272 | 1627 |

Malheureusement, il n'existe à l'heure actuelle que trop peu de longues séries des débits instantanés pour effectuer une ébauche régionale, comme nous l'avons tenté sur base de l'analyse des débits moyens journaliers maximums. On note cependant que les trois rivières des Hautes Fagnes présentent des débits spécifiques de crue nettement plus importants que ceux de la Warche, ceci pour les raisons évoquées au § III. C.

IV. IMPACT DES BARRAGES SUR L'ECRETEMENT DES CRUES

Afin de cerner le rôle que jouent les barrages dans l'écrêtement des crues, nous avons comparé les valeurs des cinq débits les plus élevés enregistrés en régime

naturel (Q_n = débits qui auraient été observés si les barrages n'avaient pas existé) et en régime perturbé (Q_r = débits régulés, effectivement lâchés par les barrages). Le rôle d'écrêtement des barrages apparaît de façon indéniable puisqu'en régime naturel on aurait dû s'attendre à avoir une crue plus que centennale et une crue dont la récurrence est de 50 ans alors que la crue maximale lâchée représente à peine une crue de récurrence de 20 ans et les autres sont inférieures à la décennale (Tableau 6). En d'autres termes, l'écrêtement assuré par les barrages, fait déjà bien connu sur la Vesdre du fait du complexe des barrages d'Eupen et de la Gileppe (Petit et al., 1999), est clairement démontré ici aussi, mais à une moindre échelle vu le volume plus réduit des retenues.

Tableau 6 - Comparaison des cinq débits instantanés (en $m^3.s^{-1}$) les plus élevés mesurés en aval des barrages depuis 1930 en régime naturel (à Robertville) et en régime perturbé

| Date | Débits mesurés en régime naturel | Débits correspondants lâchés en aval des barrages | |
|------|----------------------------------|---|-------------|
| | | Butgenbach | Robertville |
| 1947 | 64,0 | 41,0 | 56,2 |
| 1970 | 50,8 | 19,5 | 14,3 |
| 1984 | 67,0 | 21,2 | 27,0 |
| 1991 | 80,0 | 34,0 | 32,0 |
| 1993 | 60,5 | 23,5 | 35,0 |

CONCLUSION

Les conclusions s'établissent à deux niveaux : d'un point de vue méthodologique tout d'abord, parce que des méthodes et des valeurs étalon sont mises en évidence et qu'elles peuvent être transposables aux rivières de Haute Belgique. D'un point de vue géomorphologique ensuite, concernant la modification éventuelle du régime hydrologique en fonction de l'affectation du sol et l'effet des barrages.

L'analyse des différents types d'ajustements montre que, lorsque l'on traite la crue annuelle exprimée en débit journalier, la loi de Jenkinson se révèle l'ajustement le plus adéquat, mais que la loi de Gumbel reste parmi les plus performantes. Lorsque les débits instantanés sont pris en considération, la distribution de Gumbel est alors le meilleur ajustement.

La formule de Fuller telle qu'elle est généralement proposée, donne une nette surestimation des débits instantanés de la Warche. Toutefois, lorsque, dans cette formule, on remplace l'exposant 0,3 par 0,5, on obtient alors de très bonnes prévisions des débits instantanés.

Des valeurs de débits spécifiques de crue décennale sont proposées; elles peuvent servir de standard pour les autres rivières pour lesquelles la série des débits est plus courte et ne permet pas ce type de traitement. On constate par ailleurs qu'il y a une certaine régionalisation des valeurs de crues proposées, en fonction du mode d'alimentation lié à la lithologie et en fonction de la localisation géographique des bassins étudiés, reflétant par là des aspects liés à des caractéristiques climatologiques, mais probablement aussi à des différences d'affectation du sol.

L'application des différents tests présentés ci-dessus révèle que la série des débits annuels de la Warche au cours de la période 1930-1988 possède un caractère aléatoire simple et montre une absence de tendance; ainsi, l'accroissement des surfaces imperméables dans le bassin (routes, urbanisation) ou le changement d'affectation du sol n'a pas modifié de manière significative la variation interannuelle des modules annuels. L'évolution temporelle reste sous la dépendance des facteurs climatiques (et principalement le régime pluviométrique) dont la variation interannuelle reste aléatoire.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les responsables d'ELECTRABEL (gestionnaires des barrages de Butgenbach et de Robertville) d'avoir mis à leur disposition un nombre considérable de données. Ils remercient également le MET-SETHY (Ministère de l'Équipement et des Transports, Service d'Études hydrologiques) et le SCENN (Service des Cours d'Eau non navigables) de leur avoir communiqué des données et résultats. Plusieurs aspects méthodologiques ont été discutés avec le D^r G. Demarée (IRM) lors de l'élaboration de la thèse de doctorat de Assani A.A., thèse qui a reçu le support financier de l'Administration générale de Coopération au Développement.

BIBLIOGRAPHIE

- AHMAD M.I., SINCLAIR C.D. & SPURR B.D., 1988. Assessment of flood frequency models using empirical distribution function statistics. *Water Resources Research*, 24 (8), 1323-1328.
- ARLERY R., GRISOLLET H. & GUILMET B., 1973. *Climatologie, méthodes et pratiques*, Gauthier-Villars, Paris, 434 p.
- ASSANI A.A., 1997. *Recherche d'impacts d'une retenue sur le comportement d'une rivière ardennaise : hydrologie, sédimentologie, morphologie, végétation. Le cas du barrage de Butgenbach sur la Warche (Belgique)*, Thèse de Doctorat en Sc. Géogr., Université de Liège, 482 p.
- BAMBONEYO J. M., 1995. *Etude des variations du régime de l'Ourthe inférieure de 1920 à 1993, à travers l'analyse des précipitations et des débits mensuels*, Mémoire de Maîtrise en Géologie des Terrains superficiels, Université de Liège, 94 p.
- BRAVARD J.P. & PETIT F., 1997. *Les cours d'eau : dynamique du système fluvial*, Coll. U, Armand Colin, Paris, 222 p.
- BUISHAND T.A. & DEMAREE G.R., 1989. Estimation of the annual maximum distribution from examples of maxima in separate seasons. *Stochastic. Hydrol. Hydraul.*, 4, 89-103.
- BULTOT F. & DUPRIEZ G.L., 1976. Bilans hydriques et données hydrologiques pour la conception et la mise en valeur des ressources en eau dans les bassins hydrographiques belges : le bassin de la Semois. *Publ. IRM, Série A*, 96, 148 p.
- BULTOT F. & GELLENS D., 1994. Sur le caractère stationnaire et cyclique des précipitations au Rwanda. *Publ. Acad. Roy. Sciences d'Outre-Mer*, 5-53.
- CHRISTIANS C. & DAELS L., 1988. Belgium, A geographical introduction to its regional diversity and its human richness. *Bull. Soc. Géogr. Liège*, 24, 3-180.
- DEMAREE G., 1990. An indication of climatic change as seen from the rainfall data of Mauritania. *Theor. Appl. Climatol.*, 42, 139-147.
- DUNNE T. & LEOPOLD L.B., 1978. *Water in Environmental Planning*, Freeman & Co., San Francisco, 818 p.
- ELABDELLAOUI J., 1993. *Fréquence et prédétermination des crues, essai de typologie régionale appliquée à la moyenne et haute Belgique*, Mémoire de Maîtrise en Géologie des Terrains superficiels, Université de Liège, 154 p.
- ESMA, 1948. *Les débits de la Warche*, Rapport stencylé inédit conservé à la centrale de Coö, 52 p.
- FERRER J.P., 1992. Analyse statistique de pluies maximales journalières. *Cahiers Orstom, Série Hydrol. Continent.*, 7 (1), 23-31.
- FRANCHIMONT C., 1994. *Dynamique fluviale de la Lesse, fréquence des inondations, morphométrie des méandres et sédimentologie du lit*, Mémoire de Licence en Sc. Géogr., Université de Liège, 121 p + annexes.
- KAISIN F. & DE PIERPONT E., 1939. *Hydrogéologie des Calcaires de la Belgique*, Coll. des Monographies des Sciences naturelles, Société scientifique de Bruxelles, 4, 109 p.
- KNIGHTON D., 1984. *Fluvial Forms and Processes*, Edward Arnold, London, 218 p.
- LAURENT A. & ALEXANDRE J., 1977. Accroissement récent de l'intensité des fortes averses dans la banlieue bruxelloise. *Bull. Soc. Géogr. Liège*, 13, 127-132.
- MBUYU N., 1989. *Etude des paramètres influençant les relations pluie-débit. Modèle de prévision des crues. Applications aux bassins alimentant le lac d'Eupen : Helle, Getz et Vesdre*, Thèse de Doctorat en Sc. Géogr., Université de Liège, 302 p.
- PAUQUET A., 1992. *Les inondations de l'Ourthe inférieure, évolution de leur fréquence et de leur importance*, Mémoire de Licence en Sc. Géogr., Université de Liège, 105 p.
- PAUQUET A. & PETIT F., 1993. Evolution de la fréquence des inondations de l'Ourthe inférieure. *Bull. Soc. belge Etudes Géogr.*, 62 (2), 361-375.
- PETIT F., 1995. Régime hydrologique et dynamique fluviale des rivières ardennaises. *DEMOULIN A. (éd.), L'Ardenne, essai de Géographie Physique, Hommage au Professeur A. Pissart*, Université de Liège, 194-223.
- PETIT F. & DAXHELET C., 1989. Détermination du débit à pleins bords et de sa récurrence dans différentes rivières de Moyenne et Haute Belgique. *Bull. Soc. Géogr. Liège*, 25, 39-52.
- PETIT F. & PAUQUET A., 1997. Bankfull discharge recurrence interval in gravel bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 685-693.
- PETIT F., PIROTTON M., PHILIPPART J.C. & LEJEUNE A., 1999. Planning of the river Ourthe in Wallonia, Belgium. *URENA J.L. (ed.), River design and environmental Protection in Europe*, Universidad de Cantabria, Santander, Ch. 7, 401-513.
- PROBST J. L., 1989. Hydrological fluctuations of some european rivers since 1800. *PETTS G.E., MOLLER H. &*

- ROUX A.L. (eds), *Historical Change of Large Alluvial Rivers*, Wiley & sons, Chichester, 41-55.
- PROBST J.L. & TARDY Y., 1985. Fluctuations hydroclimatiques du bassin de l'Aquitaine au cours des 70 dernières années. *Revue de Géol. Dynam. et Géogr. Phys.*, 26, 56-76.
- RICHARDS K.J., 1983. *Rivers, Form and Process in Alluvial Channels*, Methuen, London, 358 p.
- SHAHIN M., VAN OORSCHOT H.J.L. & DE LANGE S.J., 1993. *Statistical Analysis in Water Resources Engineering*, Balkema, Amsterdam, 394 p.
- SNEYERS R., 1975. *Sur l'analyse statistique des séries d'observations*, WMO, note technique, N° 143, Genève, 192 p.
- SNEYERS R., VANDIEPENBEEK M., VANLIERDE R. & DEMAREE G.R., 1990. Climatic changes in Belgium as appearing from the homogenized series of observations made in Brussels-Uccle. *SCHIETECAT (éd.), Contributions à l'étude des changements climatiques*, IRM, Bruxelles, 17-20.
- SPORCK J., 1951. Etude du régime de la Gileppe d'après les relevés quotidiens effectués au barrage de 1880 à 1947. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, 75, 97-109.
- VEREERSTRAETEN J., 1970. Le bassin de la Meuse : Etude de géographie hydrologique. *Revue Belge Géogr.*, 94, 339 p.
- WALLIS J.R. & WOOD E.F., 1985. Relative accuracy of log Pearson III procedures. *J. Hydraulic Engineering*, 111, 1043-1056.

Adresse des auteurs :
Département de Géographie physique
Institut de Géographie
Université de Liège
Allée du 6 Août, 2 - Bât. B11
Sart Tilman
B 4000 Liège