Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 88 (2002-2003)
Heft: 2

Artikel: Evolution simulée des niveaux dans le système des Trois-Lacs
Autor: Montmollin, François de / Montmollin, Gautier de
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-281421

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

S V S N Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat. 88.2: 121-129. ISSN 0037-9603

Evolution simulée des niveaux dans le système des Trois-Lacs

par

François de MONTMOLLIN[1] *et Gautier de MONTMOLLIN*[2]

Abstract.–de MONTMOLLIN F. and de MONTMOLLIN G., 2002. Simulated evolution of the level in the «Trois-Lacs system» (Bienne, Morat, Neuchâtel), Switzerland. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 88.2*: 121-129.
The lake network named «lesTrois-Lacs» (formed by the lakes (Bienne, Morat, Neuchâtel), in Switzerland, is connected by two channels: the Broye and the Thielle. Since 1868 these two rivers were transformed into channels and by diverting the bigger Aare river a levelling systemwas made among the three lakes to absorb the flows downstream andto balance the lakes themselves. Using informations on incoming and outgoing flows, it is possible, interesting and useful to build a predictive model of the heightof each lake with a system of differential equations. Numerically realized with the Runge-Kutta scheme, we tested it with some success, for instance in the difficult context of the historical flood in May 1999.

Keywords: lake, channel, levelling, balancing, flow, level, flood, differential equation, numerical simulation, Trois-Lacs, Bienne, Morat, Neuchâtel.

Résumé.–De MONTMOLLIN F. et de MONTMOLLIN G., 2002. Evolution simulée des niveaux dans le système des Trois-Lacs. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 88.2*: 121-129.
Le système lacustre dit des Trois-Lacs (Bienne, Morat, Neuchâtel), en Suisse, est relié par deux canaux: la Broye et la Thielle. En transformant dès 1868 ces deux rivières en canaux et en détournant l'Aare, on a fait des trois lacs un système de régulation fluvial pour absorber les crues menaçant l'aval et pour équilibrer les lacs entre eux. Sur la base d'informations sur les débits entrants et sortants, il est possible, intéressant et utile de faire un modèle prédictif des variations de hauteur de chaque lac à l'aide d'un système d'équations différentielles. Réalisé numériquement avec le schéma de Runge-Kutta, nous l'avons mis à l'épreuve avec un certain succès par exemple dans le contexte difficile de la crue historique de mai 1999.

Mots clés: lac, canal, régulation, équilibre, débit, niveau, crue, équations différentielles, simulation numérique, Trois-Lacs, Bienne, Morat, Neuchâtel.

[1]Case postale 14, CH-2072 St-Blaise.
fdemontmollin@dplanet.ch

[2]Albisrieder-Strasse 395, CH-8047 Zürich.
gautier.de.montmollin@converium.com

CODEN: BSVAA6

© Société vaudoise des Sciences naturelles
Droits de reproduction réservés

Introduction

La région des Trois-Lacs (lacs de Morat, Neuchâtel et Bienne) a offert un cadre majestueux et varié pour l'Exposition nationale. Voyageant d'un Arteplage à l'autre sur une navette Iris, le visiteur avait un peu de temps pour contempler les rives verdoyantes avant de retrouver de purs fruits de l'imagination. S'est-il douté que Nature et Artifice (le thème de l'Arteplage de Neuchâtel) se partagent aussi la circulation des eaux dans cet ensemble aquatique ?

La nature a été ici modifiée par l'homme plus qu'il n'y paraît à première vue. L'Aare, un fleuve parfois impétueux, a été détourné de son cours primitif pour se déverser dans le lac de Bienne, alors qu'auparavant il allait dévaster les régions en aval. C'était l'époque où «l'homme domptait la Nature» et ne craignait pas de la corriger sévèrement quand elle se montrait récalcitrante, d'où les première et deuxième «Corrections des eaux du Jura» (1868-1891/ 1960-1973) (fig. 1).

Figure 1.–Première correction des eaux du Jura (OFEG 2001).

Lors de grandes crues, le lac de Bienne, trop petit, ne suffit plus comme régulateur et le lac de Neuchâtel entre à son tour en jeu. En conséquence, la Thielle qui les relie se met alors à couler en sens inverse.

Le but de cette publication est de proposer une méthode de calcul permettant de simuler la régulation de ce système.

Modèle hydraulique

Formules pour l'écoulement des cours d'eau

Les nivaux des lacs sont enregistrés depuis fort longtemps (pour celui de Neuchâtel, dès 1817). Quant aux débits des échanges entre les trois lacs, les mesures directes sont beaucoup plus récentes et les appareils à ultrasons capables de les enregistrer en continu ne fonctionnent bien que depuis quelques

années. En général, les débits d'une rivière peuvent être assez facilement relevés en continu, grâce à l'enregistrement du niveau, puis en utilisant une relation univoque (la courbe de tarage), liant niveau et débit.

Il n'en va pas de même pour les cours d'eau dont la pente est susceptible de varier, typiquement, un canal. Avant la technique des ultrasons, on établissait laborieusement des faisceaux de courbes de tarage, avec une courbe pour chaque valeur ronde de la pente, sur la base de jaugeages effectués au moulinet hydrométrique. Des ajustements statistiques sur des paramètres de courbes analytiques auraient aussi été possibles mais, avant les ordinateurs, les calculs prenaient trop de temps pour les besoins de la pratique.

Notre but étant de modéliser les écoulements dans le système des Trois-Lacs, cette approche analytique convient très bien pour obtenir les débits de la Broye et de la Thielle, puisque ceux-ci dépendent des niveaux *simulés* des lacs reliés. A leur tour, ces niveaux vont naturellement dépendre en variation de ces débits, mais non exclusivement.

En hydraulique fluviale, les formules d'écoulement ne manquent pas, mais, curieusement, celles répondant aux besoins courants sont relativement rares. On trouve partout les formules de Chésy et de Manning, du type

$$V = C\,R^x\,S^y \qquad (1)$$

où V est la vitesse moyenne de l'eau dans la section transversale du cours d'eau, C un coefficient, S la pente et R le *rayon hydraulique* défini par le quotient de la surface de l'eau dans la section du fleuve divisé par le périmètre mouillé dans cette même section. VEN TE CHOW (1959) note que ce sont les formules les plus utilisées, voir aussi VEN TE CHOW (1964).

Ce qui nous intéresse ici est d'obtenir le débit, étant donné que la seule chose connue est le niveau de l'eau. Le *rayon hydraulique*, lui, n'est pas directement mesurable. En multipliant les deux membres de l'équation (1) par la surface de l'eau dans la section, et après quelques simplifications, possibles dans une large section rectangulaire où le périmètre mouillé varie très peu avec la hauteur d'eau h (contrairement à la surface), on tombe sur une équation beaucoup plus facile à utiliser, de la forme

$$Q = a\,h^b\,i^c \qquad (2)$$

où Q est le débit, a un coefficient, h la hauteur d'eau, i la pente, b et c des exposants (RÉMÉNIÉRAS 1965).

Les constantes a, b et c vont être déterminées par régression multiple sur la base d'observations effectuées sur le terrain, c'est à dire des jaugeages au moulinet.

La formule (2), bien que peu utilisée, est connue depuis fort longtemps. En effet, on la trouve chez EPPER (1909), avec un coefficient a ajusté et les exposants fixés arbitrairement ($b=3/2$ et $c=1/2$). La formule générale pour une pente constante y est citée comme ayant été établie par HARLACHER (1883), à Prague, dans une publication de la commission hydrographique du royaume de Bohème.

L'idée d'ajuster les paramètres de (2) par les moindres carrés, en supposant la pente constante, réapparaît beaucoup plus tard, dans la Norme ISO 1100 (ISO 1983). En cas de variation de la pente, seule y est proposée une méthode empirique et compliquée. La méthode statistique, avec ajustement de courbes à des données d'observation, apparaît rarement dans les traités d'hydraulique. Cependant, dans la pratique, on ne se fie qu'aux jaugeages et la méthode statistique, déjà du temps d'Epper, a toujours été accompagnée d'une étude approfondie des déviations, c'est-à-dire des différences entre valeurs fournies par le calcul et valeurs mesurées.

Modèle d'écoulement des canaux de la Broye et de la Thielle

Symbolisons par β la Broye qui relie le lac de Morat (M) au lac de Neuchâtel (N) et par θ la Thielle reliant le lac de Neuchâtel au lac de Bienne (B). Les niveaux des lacs, en mètres d'altitude au-dessus du niveau de la mer, sont notés respectivement h_M, h_N et h_B. Pour les canaux, la relation hauteur-débit (2) a pour particularité que les niveaux des lacs reliés déterminent

1–la hauteur d'eau h qui est essentiellement la moyenne des niveaux au-dessus de l'altitude du fond du canal, et

2–la pente i qui est la différence des niveaux (variable) divisée par la longueur (que nous pouvons raisonnablement supposer fixe et donc inclure dans la constante a). Il faut tenir compte du fait que la pente i peut changer de signe.

Ainsi, pour la Broye, on a en fonction des niveaux des lacs de Morat (h_M) et de Neuchâtel (h_N) la hauteur d'eau

$$\frac{h_M + h_N}{2} - h_\beta$$

où $h_\beta=426$ est l'altitude du fond du canal. En appliquant la relation (2), le débit de la Broye peut être donc modélisé par

$$Q_\beta(h_M, h_N) = a_\beta \cdot \left(\frac{h_M + h_N}{2} - h_\beta \right)^{b_\beta} \cdot \text{signe}\left(h_M - h_N\right)\left|h_M - h_N\right|^{c_\beta}. \qquad (3)$$

Les valeurs des paramètres, obtenus par régression à partir de jaugeages, sont

$$\begin{array}{ll} a_\beta & 15.223 \\ b_\beta & 1.868 \\ c_\beta & 0.483 \end{array} \tag{4}$$

Pour le débit Q_θ de la Thielle nous avons aussi un fond à h_θ=426 et des paramètres ajustés

$$\begin{array}{ll} a_\theta & 18.582 \\ b_\theta & 2.511 \\ c_\theta & 0.482 \end{array} \tag{5}$$

Equation d'équilibre entre les lacs

Désignons par $h=(h_B, h_M, h_N)$ les niveaux des trois lacs. Leur variation est régie par l'équation différentielle ordinaire

$$h'(t)=f(h(t), t) \tag{6}$$

où la fonction de variation des niveaux $f=(f_B,f_M,f_N)$ est modélisée pour chaque lac par le bilan des débits le concernant divisé par sa surface.

$$\begin{aligned} f_B &= (Q_{eB} + Q_\theta - Q_{sB}) / S_B \\ f_M &= (Q_{eM} - Q_\beta) / S_M \\ f_N &= (Q_{eN} + Q_\beta - Q_\theta) / S_N \end{aligned}$$

Les fonctions $Q_\beta(h_M, h_N)$ et $Q_\theta(h_N, h_B)$ sont les débits des canaux définis plus haut. A l'image des cours d'eau qu'elles représentent, elles forment «les canaux mathématiques» entre les trois composantes du système différentiel (6).

Les débits $Q_{eB}(t)$, $Q_{eM}(t)$ et $Q_{eN}(t)$ forment idéalement la somme des cours d'eau se jetant dans chaque lac. Enfin, $Q_{sB}(t)$ est le débit de l'Aare à la sortie du lac de Bienne, régulé par une écluse à Port. Soulignons que ces débits extérieurs sont ceux des cours d'eau jaugés et dont les débits sont publiés dans l'Annuaire hydrologique de la Suisse (SHGN 1999), ce qui reflète peut-être imparfaitement les flux extérieurs totaux et particulièrement les flux entrants.

En résumé, les niveaux des lacs $h_B(t)$, $h_M(t)$ et $h_N(t)$ sont les fonctions *inconnues* du système différentiel (6), les niveaux en $t=0$, $h_B(0)$, $h_M(0)$ et $h_N(0)$ en sont les *conditions initiales* et les débits extérieurs, $Q_{eB}(t)$, $Q_{eM}(t)$, $Q_{eN}(t)$ et $Q_{sB}(t)$ en sont les *conditions aux limites*.

SIMULATION

Nous avons simulé l'évolution des niveaux en approchant le système différentiel (6) par la méthode de Runge-Kutta «classique» d'ordre 4, voir HAIRER *et al.* (1987). Le pas de temps Δ_t de ¼ d'heure est suffisamment petit pour assurer un équilibrage des niveaux des lacs au 1/10e de millimètre pour un problème à débits externes $(Q_e(t),Q_s(t))$ nuls.

Pour un exemple réel, nous avons pris la crue historique de mai 1999. Les niveaux initiaux sont ceux au 30 avril 1999 et les débits $Qe_B(t)$, $Qe_M(t)$, $Qe_N(t)$ et $Qs_B(t)$, donnés pour chaque jour, sont interpolés linéairement au cours des pas de temps de la simulation. Sur la figure 2 on peut en voir le résultat et, pour comparer, les niveaux historiques sur la figure 3. Le gros de la crue de l'Aare s'est produite entre le 11 et le 15 mai (fig. 6), soit entre l'heure 250 et l'heure 344. Il est intéressant de voir qu'au même moment, le débit $Qs_B(t)$, régulé à Port, a été fortement réduit (fig. 7), sans doute pour compenser d'autres crues en aval ou par mesure de prévention. En conséquence, le lac de Bienne s'est rempli et a rempli son rôle de réservoir au point d'avoir très vite un niveau supérieur à celui du lac de Neuchâtel. Cela provoque naturellement une inversion de la Thielle aussi bien dans la simulation (fig. 4) que dans les mesures (fig. 5).

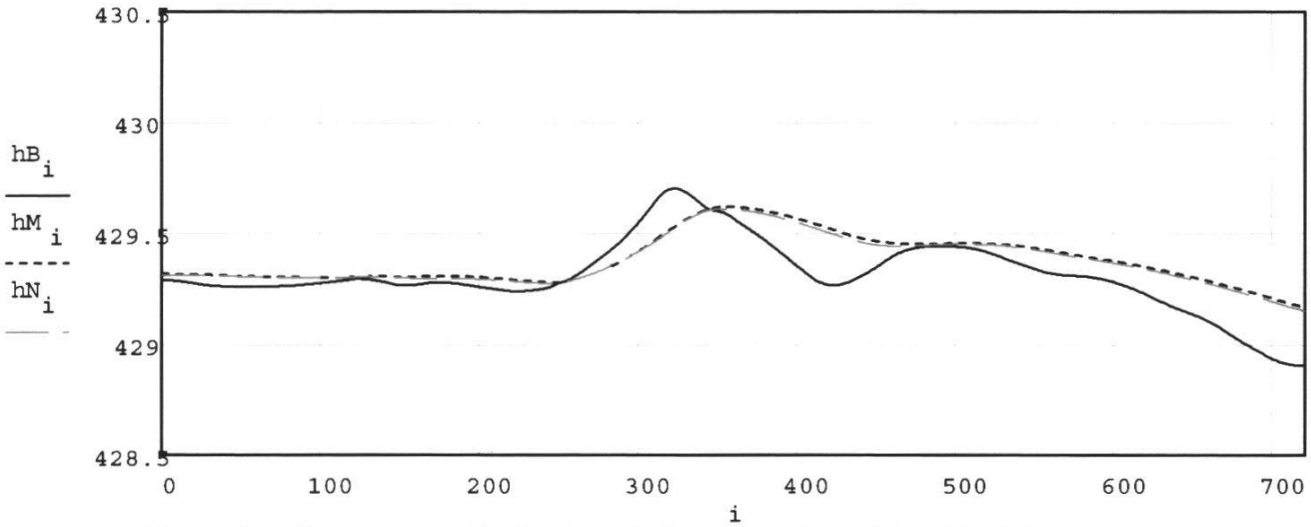

Figure 2.–Niveaux simulés des lacs de Bienne, Morat, Neuchâtel (en m).

On observe que les va-et-vient dans le débit de la Thielle sont remarquablement bien calculés. Les niveaux simulés des lacs ont un comportement cohérent, mais ils baissent ensemble trop en comparaison des niveaux mesurés. Cela peut s'expliquer par le fait mentionné plus haut que les débits extérieurs sont uniquement basés sur les données publiées de cours d'eau jaugés. Beaucoup de petits affluents sont donc négligés faute de données, lacune qui peut être importante surtout en période de crue, alors que le débit sortant du

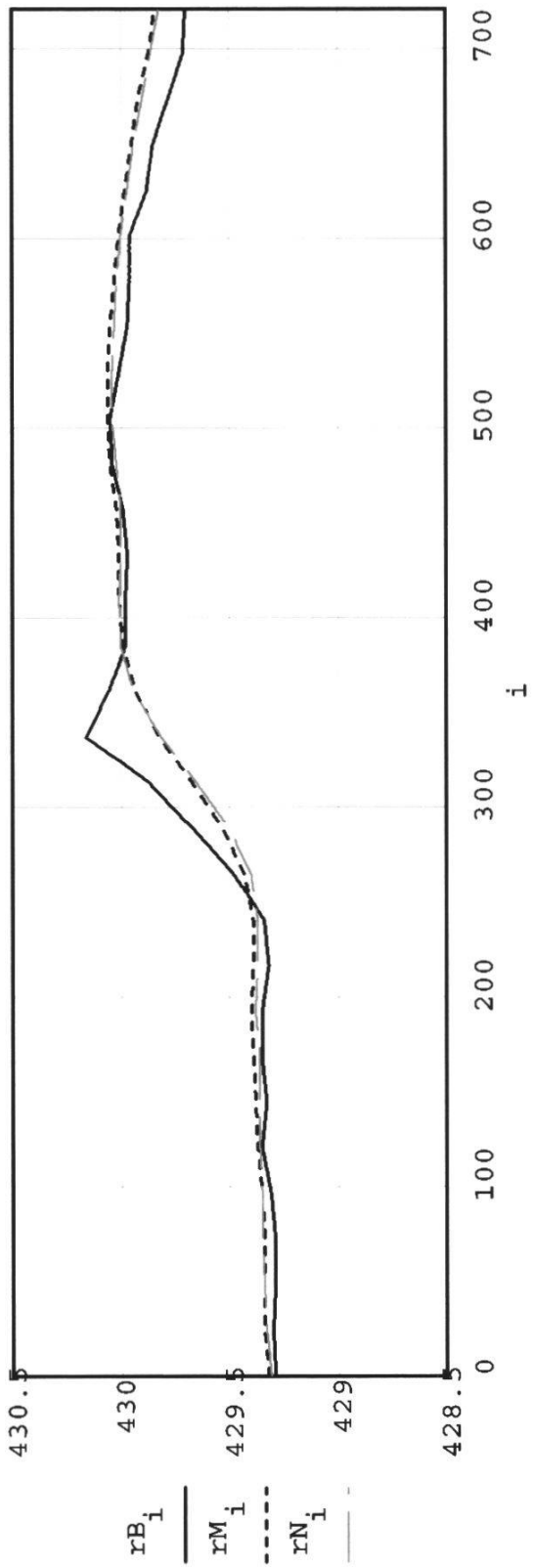

Figure 3.–Niveaux historiques des lacs de Bienne, Morat, Neuchâtel (en m).

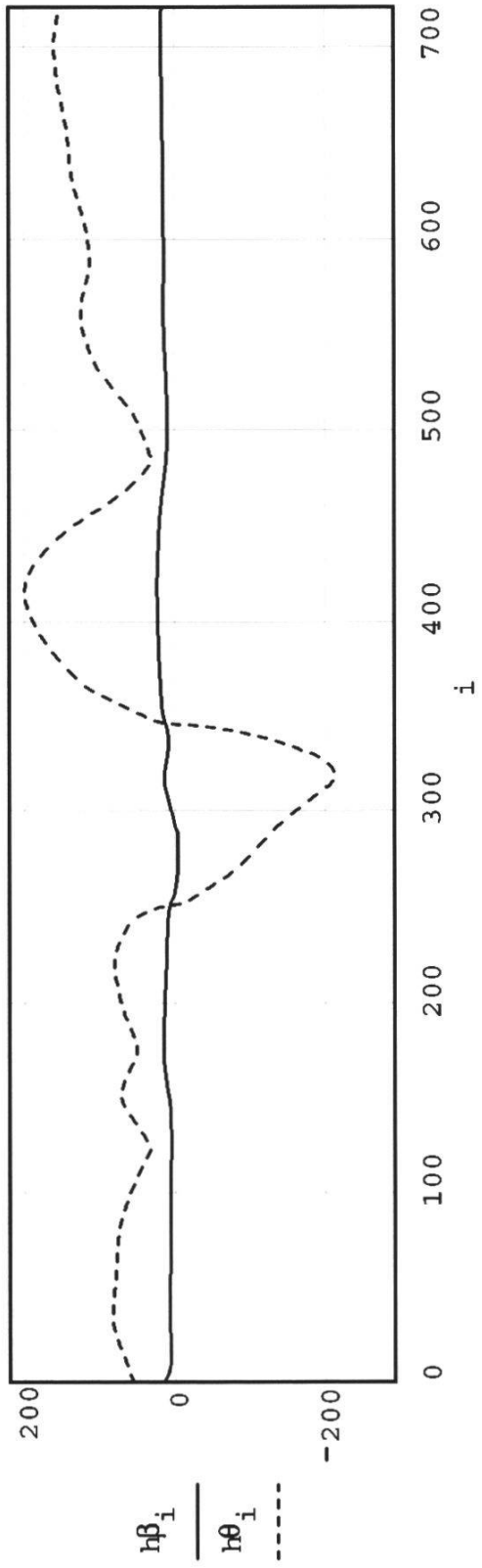

Figure 4.–Débits simulés des canaux de la Broye et de la Thielle (en m^3/s).

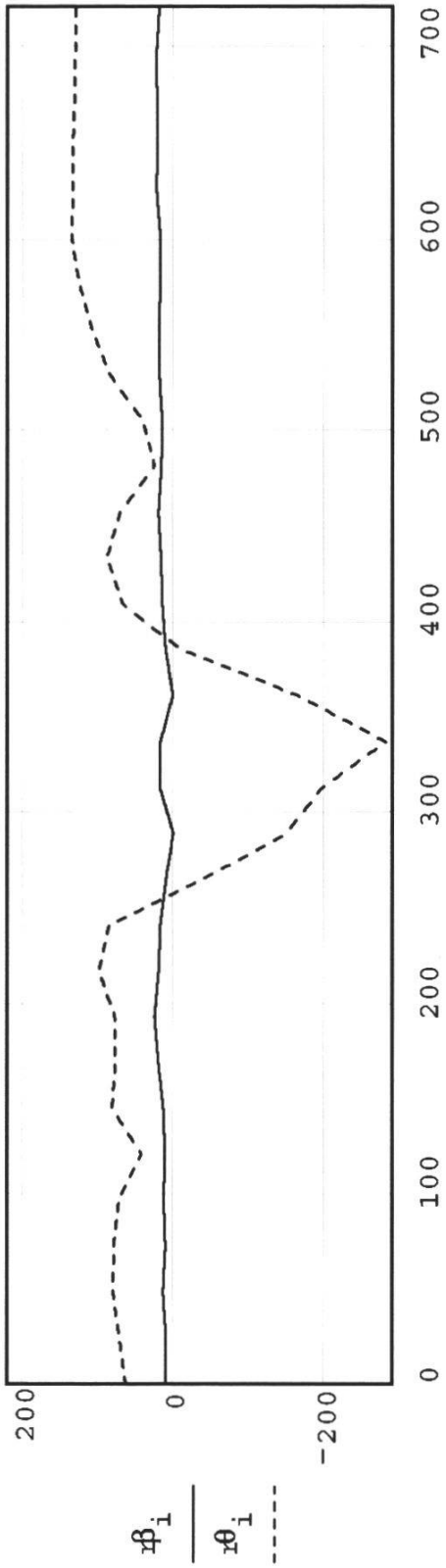

Figure 5.–Débits historiques des canaux de la Broye et de la Thielle (en m^3/s).

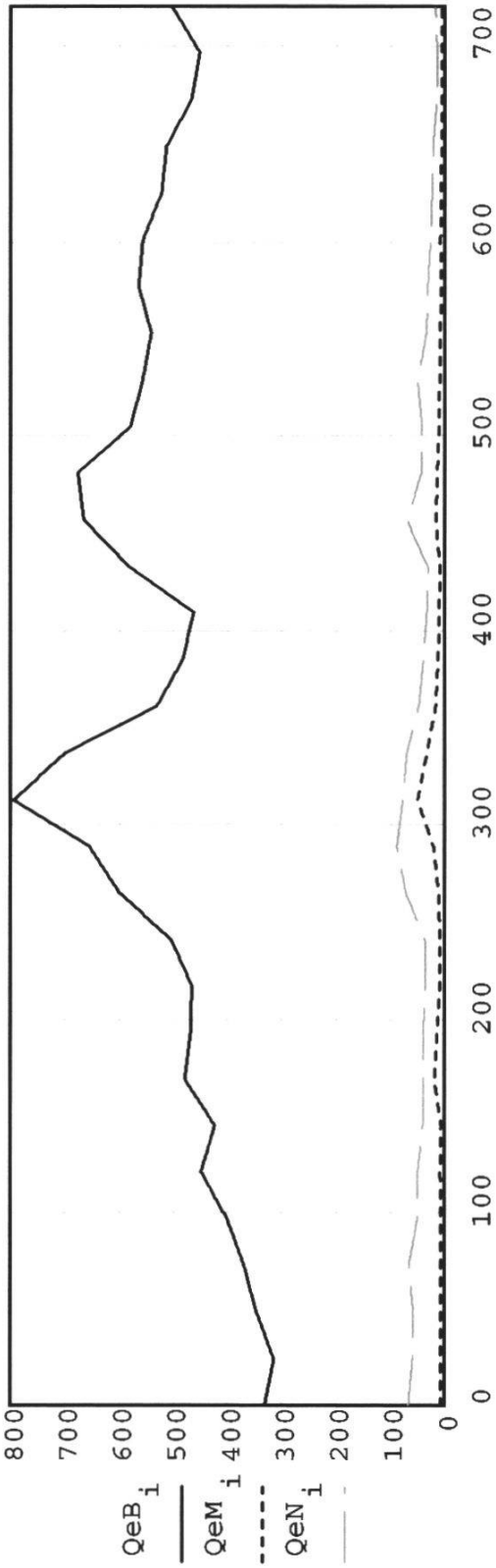

Figure 6.–Débits entrants dans les lacs de Bienne, Morat, Neuchâtel (en m^3/s).

système des Trois-Lacs consiste essentiellement en le débit $Q_{sB}(t)$ mesuré à la sortie du lac de Bienne. D'autre part, l'étalonnage des stations hydrométriques de Gampelen et de Sugiez est basé sur des mesures anciennes et pourrait être actualisé.

Programme

La source du programme de simulation en Ada 95 et ainsi que les données issues de l'Annuaire (SHGN 1999) sont à disposition auprès des auteurs.

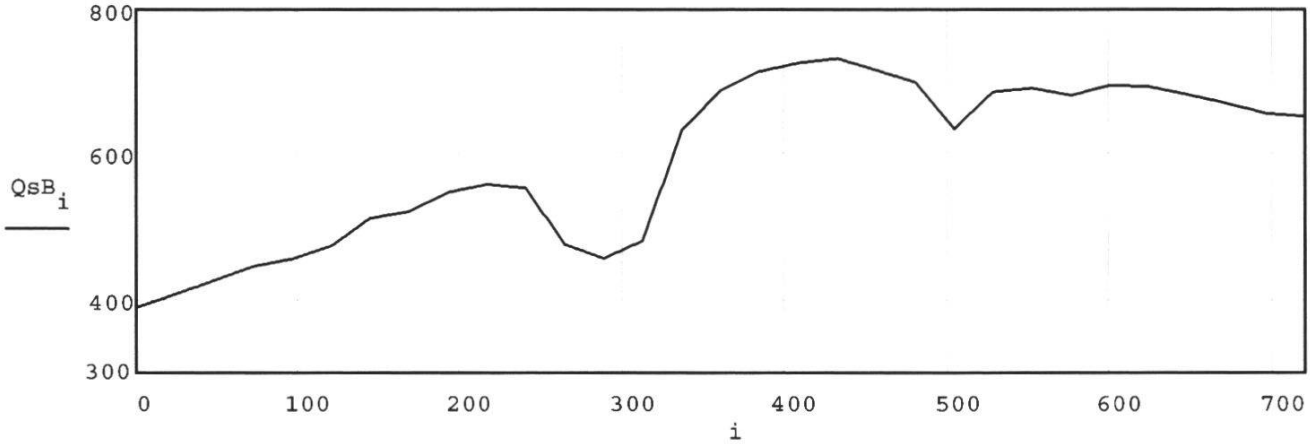

Figure 7.–Débit sortant du lac de Bienne; niveau de l'Aare à Brugg (en m^3/s).

Bibliographie

Chow Ven Te, 1959. Open-channel hydraulics. International Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd.

ChowVen Te, 1964. Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill.

Epper J.,1909. Le développement de l'hydrométrie en Suisse. Bureau hydrométrique fédéral.

Hairer E., Nørsett S.P. and Wanner G.,1987. Solving Ordinary Differential Equations I. Springer-Verlag.

ISO Recueil de Normes ISO 16, Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts. Organisation internationale de normalisation, case postale 56, CH-1211 Genève 20.

OFEG, 2001. Les cours d'eau du pied du Jura avant et après la 1e CEJ. Office fédéral des eaux et de la géologie, Bienne.

Réméniéras G., 1965. Hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles.

SHGN (Serv. Hydr. et Géol. Nat.), 1999. Annuaire hydrologique de la Suisse.

Manuscrit reçu le 20 avril 2002