Gestion des grands plans d'eau naturels

Effacité des estimations hydrologiques à validations complémentaires Cas des bilans journaliers du lac de Grand-Lieu, Loire-Atlantique

G. Galéa

CEMAGRE Lyon

Division « Hydrologie-Hydraulique » - 3 bis, quai Chauveau, 69336 Lyon Cedex 09

1. Préambule

L'exemple du lac de Grand-Lieu (GALÉA 1990) permet de montrer, entre autres, comment la limite implicite (quant à la validité des résultats obtenus) des outils hydrologiques, aussi performants soient-ils, en matière de modélisation des apports et de bilan hydrologique, a pu être levée grâce à l'observation hydro-météorologique disponible en quelques sites particuliers.

L'étude hydrologique a été réalisée dans le cadre d'un vaste programme scientifique pluridisciplinaire (1992), dont la coordination a été assurée par A. DURBEC et A. DUTARTRE (CEMAGREF Lyon et Bordeaux), et pour lequel le Syndicat d'Aménagement Hydraulique Sud-Loire a assuré le rôle de maître d'ouvrage.

2. Contexte de l'étude hydrologique

Grand-Lieu (*fig. 1*) est un lac naturel situé dans des terrains métamorphiques anciens, d'âge hercynien, au Sud-Ouest de la ville de Nantes (Loire Atlantique). En période de basses eaux la superficie ennoyée représente 4 000 ha

contre 6 300 ha en hautes eaux. Le lac est alimenté par deux rivières : l'Ognon qui draine un bassin versant de 185 km² et la Boulogne qui draine un bassin versant de 485 km². L'Acheneau, contrôlé par le vannage de Bouaye qui détermine la cote maximale du lac à la fin de la période de hautes eaux, est l'exutoire naturel du lac vers l'estuaire de la Loire.

La modification envisagée de la gestion actuelle du seuil de Bouaye (1,85 m par référence à l'échelle de Buzay), pour une cote plus élevée, afin de limiter son envasement et d'améliorer son état d'eutrophisation, n'est pas sans conséquence sur l'ensemble du système hydraulique où le lac joue, en particulier, un rôle important d'écrêtement des crues en hiver.

L'étude hydrologique a permis d'effectuer :

- l'analyse des risques de défaillances associés aux hypothèses de gestion du seuil de Bouaye permettant d'assurer un étiage du lac compatible, entre autres, avec une amélioration de la qualité de l'eau ;
- la prédétermination des quantiles de crues et d'hydrogrammes synthétiques monofréquences à des fins de simulations hydrauliques particulièrement étudiées par J.B. FAURE *et al.* (1992).

Management of natural large lakes

Efficiency of hydrological estimations by complementary validation

Case study of the daily water balance of Grand-Lieu Lake (France, Loire-Atlantique)

The hydrological study of the lake Grand-Lieu, proves (among other results) the essential role played by the hydrometeorological data, measured at least in some discarded points in study area, both for the modelling of the basin's outflows as well as for the lake water balance. ☆ The simulation of the lake inflows was validated by two different ways : a conceptual model (upstreaming model) and a descriptive synthetic model (downstreaming model). ☆ In the present paper we are giving only the modelling results of the basin's outflows and the lake water balance simulations. This step is an unavoidable one before any objective choice of an efficient water-lake management policy.

1. Lac de Grand-Lieu — Présentation du bassin versant d'alimentation et des points de mesure.

3. Information disponible

Nous présentons ici l'aspect modélisation des apports journaliers et des crues des bassins versants non jaugés, ainsi que le calage de l'équation du bilan hydrologique du lac dans les conditions de gestion actuelle du seuil de Bouaye. Cela constitue un préalable à la simulation hydraulique (étiage du lac, écrêtement des crues) de toute nouvelle hypothèse de gestion de la cote du seuil de Bouaye.

Le bassin versant de l'Ognon ($S = 185 \text{ km}^2$) est partiellement contrôlé, depuis environ 25 ans (12/64-04/90), à la station hydrométrique de Villeneuve-les-Sorinières ($S = 147 \text{ km}^2$).

Le bassin versant de la Bourgogne ($S = 485 \text{ km}^2$) est lui aussi partiellement jaugé, depuis environ 9 ans (08/81-05/90), dans sa partie amont à la station hydrométrique de

La Vacherie ($S = 193 \text{ km}^2$) et sur l'un de ses affluents aval : la Logne à La Roussière ($S = 130 \text{ km}^2$).

L'information hydrométrique relative à ces trois stations, gérées par le SRAE de Nantes, est disponible sur la base de données nationales HYDRO.

Ces deux bassins versants (fig. 1) de l'Ognon et la Boulogne représentent le bassin versant d'alimentation ($S = 670 \text{ km}^2$) effectif du lac de Grand-Lieu.

Sur le lac de Grand-Lieu proprement dit, nous disposons de 19 années (1966-1984) de relevés journaliers de la cote du lac référencée à l'échelle de Buzay. Ces relevés nous ont été fournis sous forme de tableaux annuels par le Syndicat d'Aménagement Hydraulique Sud Loire (Union des prés-marais).

Les données météorologiques concernent essentiellement la pluie journalière (05/45-08/90) et l'évapotranspiration (ETP) décennale interannuelle (1951-1980) PENMAN à la station de Nantes Bouguenais gérée par Météo France.

4. Présentation de la démarche suivie

Sur les trois sites observés nous validons un modèle conceptuel global pluie-débit GR3J de type descendant (downstreaming) et un modèle descriptif synthétique QdF (débits-durées-fréquences) de type ascendant (upstreaming). Ces modèles, sur lesquels nous reviendrons ultérieurement, permettent pour ce qui est de GR3J de simuler des débits journaliers (Q_j) et pour ce qui est de QdF de prédéterminer des quantiles de crues $VCX(T, d)$ sur une large plage de fréquences ($0,5 \leq T(\text{an}) \leq 1\,000$) et pour différentes durées (d) continues ($1 \text{ s} \leq d \leq 30 \text{ j}$) de la caractéristique de débit moyen maximal $VCXd$.

Après validation sur les trois sites observés, les modèles GR3J et QdF sont utilisés pour estimer les apports globaux des bassins versants de la Boulogne et de l'Ognon à l'exutoire (lac). De la confrontation des résultats obtenus par ces deux voies différentes, en découle le degré de validité des simulations effectuées, à partir des 45 années de pluie observée à la station de Nantes Bouguenais, sur les bassins versants d'alimentation du lac de Grand-Lieu. Cette validation est poursuivie en montrant que le modèle GR3J permet, grâce à son intégration spatiale conceptuelle de l'écoulement, de simuler de manière satisfaisante les apports journaliers d'un bassin versant intermédiaire.

Pour terminer, nous définissons le choix optimal des paramètres de l'équation du bilan hydrologique journalier du lac susceptible de rendre compte, en particulier, de l'état de basses eaux observé (1966-1984), dans les conditions de gestion actuelle du seuil de Bouaye.

5. Présentation du modèle GR3J

La figure 2 présente le schéma conceptuel du modèle pluie-débit GR3J mis au point par C. MICHEL *et al.* (1989). La pluie journalière et l'ETP FENMAN décadaire interannuelle constituent ses entrées.

Le réservoir sol (S), qui a comme seule sortie le prélèvement occasionné par l'évaporation réelle (E_s), répartit la pluie nette (P_N) entre lui-même (P_s) et le réservoir R (P_R). Cette répartition est sous la dépendance de $(S/A)^2$, A étant la capacité maximale de S exprimée en millimètre.

Un hydrogramme unitaire (HU), de forme parabolique, assure la fonction d'étalement de la pluie nette (P_R) entre le réservoir de production (S) et le réservoir eau gravitaire (R). La forme continue de cet hydrogramme, si $q(t)$ est son ordonnée en fonction de t , peut s'écrire :

$$q(t) = (3 * t^2)/C^3 \quad (1)$$

où C est le temps de base de l'hydrogramme unitaire exprimé en jour avec :

$$\int_0^C q(t) * dt = 1$$

Le réservoir eau gravitaire (R), à vidange quadratique, délivre le débit $Q1$. Il est caractérisé par sa rétention maximale à un jour (B) exprimée en millimètre. Ce réservoir reçoit en début de pas de temps 95 % de la fraction de pluie nette routée (P_R') par l'hydrogramme unitaire ; les 5 % restants introduits directement dans la rivière constituent le débit $Q2$.

Le débit journalier (Q_j) selon ce schéma conceptuel s'écrit : $Q_j = Q1 + Q2$.

6. Présentation du modèle QdF

Les travaux de G. GALÉA *et al.* (1989, 1990), sur la synthèse régionale des crues de la région Bourgogne, ont permis d'établir un modèle (QdF) descriptif synthétique des connaissances régionales en crues au sens des $VCXd$ (débit moyen maximal annuel sur une durée continue d).

Ce modèle QdF permet de prédéterminer des quantiles de crues en $VCX(T, d)$ sur des sites non jaugés, de superficie très variable (quelques hectares à plusieurs centaines de km^2), connaissant les paramètres locaux D (durée caractéristique de crue du bassin versant au sens de la méthode « SOCOSE », CEMAGREF-1980) et QIXA10 (débit instantané maximal annuel décennal).

LIXIN JIN *et al.* (1990), et certains travaux en cours notamment dans le cadre du projet européen FRIEND, ont montré que ce modèle QdF à vocation régionale pouvait avoir une représentativité étendue à d'autres bassins versants de régions différentes.

2. Présentation du modèle conceptuel GR3J.

Les équations du modèle QdF définies pour d (durée continue) :

$$0,0003 \leq d(h) \leq 720$$

et T (période moyenne de retour) sont les suivantes :
pour,

$$0,50 \leq T(\text{an}) \leq 20$$

$$VXC(T, d) = [(1/E + 0,016) * \ln(T) + 1/F + 0,172] * QIXA10 \quad (2)$$

avec,

$$E = (2,635 * d/D) + 6,19$$

$$F = (1,045 * d/D) + 2,385$$

et pour $20 < T(\text{an}) \leq 1\,000$.

$$VCX(T, d) = VCX(T = 10, d) +$$

$$(2)$$

$$+ [1/G * \ln(1 + G * (T - 10)/(10 * H))] * QIXA10 \quad (3)$$

avec,

$$G = (1,01 * d/D) + 1,84$$

$$H = (2,632 * d/D) + 4,436$$

7. Calage et validation du modèle GR3J sur les trois sites observés

Nous considérons que la pluie journalière observée ainsi que l'ETP décadaire interannuelle mesurée, à la station météorologique de Nantes Bouguenais, sont des variables climatiques représentatives des bassins versants d'alimentation du lac de Grand-Lieu.

Le calage du modèle GR3J, sur chaque site jauge, a été réalisé sur les débits journaliers de l'année 1984. Cette année, considérée sur la période 1981-1990, présente une variabilité saisonnière des débits tout à fait représentative de l'écoulement observé sur les bassins versants, cela est essentiel pour l'optimisation des paramètres A, B et C du modèle GR3J. Pour tenir compte de la très forte variabilité saisonnière des débits, le calage optimal a nécessité, pour chacun des sites, une correction systématique des pluies journalières qui majore de 10 % les pluies de la « saison hiver » (mois 10 à mois 5) et minore de 50 % les pluies de la « saison été » (mois 6 à mois 9). Cela est généralement le « passage obligé » pour traduire la pluie locale (Nantes Bouguenais) en pluie moyenne de bassin représentative de l'écoulement observé, en particulier en été où nous avons des systèmes orageux localisés.

Nous pouvons conclure à la bonne adéquation du modèle GR3J (plus de 75 % environ de la variance des débits est expliquée) pour représenter l'écoulement journalier en crue et en étiage des bassins versants observés. A titre d'illustration graphique nous donnons à la figure 3 quelques séquences de chroniques de débits journaliers observés et issues du calage ainsi que de la validation de GR3J.

8. Validation du modèle QdF sur les trois sites observés

A partir des relations (2) et (3) et des caractéristiques D et QIXA10 (définies statistiquement au sens de « SOCOSE », CEMAGREF 1980) relatives à chaque bassin versant le modèle QdF permet de prédéterminer les quantiles de crues pour différentes durées et diverses plages de fréquences.

Pour valider ces résultats, il est nécessaire de les comparer à ceux qui seraient obtenus selon une démarche statistique classique. A savoir :

— sur les échantillons de débits de durée (d) donnée ($1 \text{ s} \leq d \leq 30 \text{ j}$), déduits des chroniques observées, nous calons par le maximum de vraisemblance un modèle de renouvellement (loi de Poisson + loi exponentielle) d'équation générale

$$VCX(T, d) = Gq(d) * \ln(T) + VCXo(d) \quad (4)$$

et défini pour $0,5 \leq T(\text{an}) \leq 20$

où Gq = gradex des débits

$VCXo$ = paramètre de position de la loi

— pour les extrapolations ($20 < T(\text{an}) \leq 1\,000$) aux fréquences rares, de la distribution des échantillons de débits observés, la forme (5) ci-après de C. MICHEL (1982), dite d'extrapolation esthétique par le gradex des pluies maximales (Nantes Bouguenais), est utilisée ;

— pour $d \geq D/2$

$$VCX(T, d) = VCX(T = 10, d) +$$

$$(4)$$

$$+ Gp(d) * \ln[1 + Gq(d) * (T - 10)/(Gp(d) * 10)] \quad (5)$$

où, $Gp(d)$ = gradex des pluies maximales sur la durée continue d

— pour $d = 1$ seconde (instantané)

L'extrapolation de la distribution des débits instantanés maximaux (QIX) aux fréquences rares sera effectuée à partir de la relation (6)

$$QIX(T) = \lambda(Cq, Cr, T) * r * VCX(T, d = D) \quad (6)$$

où,

r = moyenne de l'échantillon $r = QIX/VCX_D$

λ = variable qui dépend selon E. COLIN *et al.* (1977) des coefficients de variation de VCX_D (Cq) et de r (Cr) ainsi que de T .

Il est donc possible à partir des relations (4), (5) et (6) de calculer les quantiles de crues d'origine statistique (observations) et de les comparer à ceux obtenus par transfert à partir du modèle QdF. De la comparaison des résultats obtenus, nous pouvons en déduire la bonne adéquation du modèle QdF à représenter l'écoulement en crue, au sens des $VCX(T, d)$, des bassins versants observés. La figure 4, à des fins d'illustration, permet de comparer pour différentes durées et fréquences les quantiles de crues « observés » sur le bassin versant de la Boulogne à La Vacherie à ceux transférés à partir du modèle QdF, connaissant $D = 30 \text{ h}$ et $QIXA10 = 66,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

3. Exemples de calage et de validation du modèle QdF.

DUREE d(h)	PERIODE DE RETOUR T (année)							
	0.5	1	2	5	10	20	50	100
0.0003	24.2	34.0	43.8	56.9	66.7	76.5	99.	117.
0.0003	31.2	39.4	47.7	58.5	66.7	74.9	102*	123*
24	21.6	29.6	37.6	48.3	56.3	64.4	82.5	97.2
24	25.9	32.2	38.5	46.8	53.2	59.5	77.4	91.8
48	17.9	25.0	32.1	41.6	48.7	55.9	67.3	76.1
48	22.7	27.9	33.1	40.0	45.1	50.3	63.6	74.6
72	14.8	21.3	27.8	36.4	42.9	49.4	58.3	65.0
72	20.7	25.1	29.5	35.4	39.8	44.3	54.7	63.6
144	14.5	18.1	21.7	26.6	30.2	33.9	39.2	43.3
144	17.3	20.5	23.7	27.9	31.1	34.3	40.5	46.2
240	11.8	15.4	19.0	23.8	27.4	31.0	35.9	39.5
240	15.2	17.7	20.1	23.3	25.8	28.2	32.1	35.9
720	7.76	9.92	12.1	14.9	17.1	19.3	22.2	24.5
720	12.5	13.9	15.3	17.2	18.6	20.0	21.0	22.4

24.2 : quantile de crue déduit statistiquement des observations

31.2 : quantile de crue transféré à partir du modèle QdF

GRAPHE DE CONTROLE : $\ln(\hat{Q}_0) = 1.09 * \ln(Q_m) - 0.358$

(R = 0.998 et C = 0.115)

Q0 = VCK(T,d) "observe"

Qm = VCK(T,d) "QdF"

4. Bassin versant de la Boulogne à La Vacherie (S = 193 km²). Validation du modèle GR3J.

9. Modélisation des apports des bassins versants non jaugés

9.1. Simulation de Qj par GR3J

9.1.1. Préalable

Pour effectuer cette simulation à partir de la série pluviométrique (1945-1990) et de l'ETP décennale interannuelle (1951-1980) de la station météorologique de Nantes Bouguenais, il faut définir au préalable les paramètres A, B et C représentatifs, à travers le modèle GR3J, de l'écoulement journalier des bassins versants non observés. Nous considérons trois sites non jaugés :

— le bassin versant de la Boulogne à l'exutoire (lac), soit 485 km² ;

— le bassin versant de l'Ognon à l'exutoire (lac), soit 185 km² ;

— le bassin versant de la Boulogne à l'exutoire (lac), excepté le bassin versant de la Logne, soit 355 km². Cela sera ultérieurement exploité pour estimer les apports journaliers d'un bassin versant intermédiaire.

9.1.2. Formules d'estimation de A, B et C (validation ?)

Bien qu'il n'y ait aucun lien direct entre les processus mesurables de l'écoulement et le schéma conceptuel de GR3J, EDJATNO (1991) a recherché à posteriori des liaisons entre les paramètres A, B, C et certaines caractéristiques physiques des bassins versants. L'analyse multivariée qu'il a réalisée sur un échantillon de 110 bassins

tableau 1

EQUATION DE REGRESSION DES PARAMETRES DE GR3J	R ²	σ
A (mm) = $0.55 * S^{0.1} * (TA)^{2.3}$ (7)	0.25	0.48
B (mm) = $S^{0.3} * PA^{1.6} / 1800$ (8)	0.25	1.26
C (mm) = $3500 * S^{0.3} / PA^{0.6} * TA^{2.4}$ (9)	0.58	0.55

S = superficie du bassin versant (km²)
 TA = température annuelle moyenne réduite au niveau de la mer (°C), voir atlas climatique de FRANCE
 PA = pluie annuelle (mm)
 σ = écart-type résiduel sur lnA, lnB et lnC

tableau 2

PARAMETRES	DETERMINATION	BASSINS VERSANTS JAUGES		
		BOULOGNE S:193km ²	LOGNE S:130km ²	OGNON S:147km ²
A (mm)	(7) GR3J(calage)	283 247	272 181	275 265
B (mm)	(8) GR3J(calage)	119 43	106 27	110 33
C (mm)	(9) GR3J(calage)	0.79 0.58	0.70 0.75	0.73 1.02

tableau 3

PARAMETRES	ESTIMATION	BASSINS VERSANTS NON JAUGES		
		BOULOGNE S':485km ²	OGNON S':185km ²	BOULOGNE S':355km ²
A' (mm)	$A_{GR3J} * (S'/S)^{0.1}$	271	271	263
B' (mm)	$B_{GR3J} * (S'/S)^{0.3}$	57	36	52
C' (mm)	$C_{GR3J} * (S'/S)^{0.3}$	0.76	1.1	0.70

versants, répartis dans diverses régions de France, a permis d'établir les relations (7), (8) et (9) consignées dans le *tableau 1* ci-après.

La variance expliquée pour A, B est relativement faible (25 %), nettement meilleure pour C (58 %), mais l'ensemble reste cependant insuffisant pour une estimation acceptable des paramètres A, B et C d'un site non jaugé. A titre de contrôle, nous avons appliqué ces relations, pour $PA = 800$ mm et $TA = 12$ °C, aux sites observés pour lesquels nous avons identifié par GR3J le jeu optimal de paramètres correspondant à chacun d'eux.

Les résultats du *tableau 2* montrent que l'estimation des paramètres A, B et C, respectivement par (7), (8) et (9) n'est pas suffisamment précise en général et plus particulièrement insuffisante pour le paramètre B. Nous rappelons que le paramètre B représente la capacité de rétention maximale à un jour du réservoir eau gravitaire (R). Ce réservoir joue un rôle important au niveau du volume de la crue et de l'intensité du débit de pointe.

9.1.3. Estimation des paramètres A', B' et C' pour chaque bassin versant non jaugé

La transposition des paramètres du modèle (GR3J) obtenus sur un bassin versant jaugé à un bassin non jaugé (incluant le bassin jaugé) peut être faite en tenant compte des valeurs respectives sur ces bassins des paramètres géomorphologiques reconnus comme explicatifs dans la synthèse citée précédemment. En fait les bassins en question ne peuvent être différenciés que par leur superficie, ce qui donne les résultats présentés dans le *tableau 3* ci-après.

9.1.4. Conclusion partielle

Nous avons vu précédemment que l'écart-type de l'erreur lié aux régressions (7), (8) et (9) est important. Même si l'information locale des sites observés arrange en principe un peu les choses, il n'en demeure pas moins que l'estimation des paramètres A', B' et C' puisse être entachée d'une imprécision trop conséquente. Aussi, une question se pose tout de même maintenant : quelle validité pouvons-nous accorder aux chroniques de débits journaliers simulés à partir de GR3J sur les bassins versants non jaugés ?

De toute évidence, ne disposant d'aucune mesure, le critère de validation peut être essentiellement obtenu par référence à une autre démarche hydrologique qui montrerait un recoupement de ses résultats avec ceux de GR3J. Nous choisissons pour cela le modèle descriptif synthétique QdF.

9.2. Prédétermination des quantiles de crues par QdF

Pour chaque bassin versant non jaugé, selon une démarche analogue à celle utilisée pour définir A', B' et C', les caractéristiques locales D et QIXA10 sont déduites des équations de régression de la synthèse nationale (CEMA-GREF 1980) sur les crues. Les équations (2) et (3) du modèle QdF permettent alors, connaissant D et QIXA10, d'obtenir par transfert sur chaque site non observé les quantiles de crues correspondants.

9.3. Comparaison des quantiles de crues « simulés » (GR3J) et « transférés » (QdF)

La *figure 5* permet de comparer (par exemple) les quantiles de crues de différentes durées (1 j, 3 j, 10 j) déduits du traitement statistique (antérieurement exposé) des Q_j simulés (1946-1990) par GR3J et transférés par QdF sur le bassin versant de la Boulogne ($S = 485$ km²).

La cohérence de ces résultats permet une première validation des simulations de débits journaliers effectuées à partir de GR3J.

Remarque : le modèle QdF permet d'obtenir les quantiles de crues instantanés maximaux. La *figure 6* permet de les comparer à ceux de GR3J, estimés à partir des quantiles de 24 h et de la relation (6).

9.4. Apports d'un bassin versant intermédiaire

Une autre manière de valider l'extrapolation des paramètres A, B et C calés sur les sites observés, aux bassins globaux d'alimentation du lac de Grand-Lieu, est de l'utiliser sur un bassin versant connu, puis de comparer les apports journaliers simulés (GR3J) et observés. A défaut d'un bassin versant jaugé, si nous considérons que le bassin versant jaugé de la Logne à la Roussière est un bassin versant intermédiaire, nous pouvons lui faire jouer ce rôle.

9.4.1. Comparaison des quantiles de crues

Nous vérifions que les quantiles de débits, déduits des apports journaliers simulés (S130) et observés, du bassin versant intermédiaire de la Logne à la Roussière, sont d'un ordre de grandeur comparable à ceux déduits de la différence d'apport (S485-S355) entre la Boulogne (S485) et la Boulogne sans la Logne (S355). L'analyse statistique des résultats (*fig. 7*), déduits des simulations effectuées à partir de GR3J sur 44 ans (46-89) et des observations (82-89), permet de considérer comme acceptable l'extrapolation des paramètres A, B et C.

9.4.2. Comparaison des modules annuels

La *figure 8* permet, comme précédemment, de conforter l'extrapolation des paramètres A, B et C. Elle montre une bonne restitution de la variabilité du module déduit d'une simulation directe (S310) ou indirecte (S485-S355) sur la période 1946-1989. En valeur moyenne interannuelle, nous obtenons pour QA_{S130} la valeur de 1,043 m³/s ($QA_{S130} = 1,043$ m³/s avec $\sigma = 0,410$ m³/s) et pour $QA_{S485-S355}$ la valeur de 0,996 m³/s ($QA_{S485-S355} = 0,996$ m³/s avec $\sigma = 0,414$ m³/s).

9.5. Conclusion partielle

La cohérence des validations précédentes permet de conclure à la représentativité des débits journaliers simulés, par le modèle GR3J, sur les bassins versants d'alimentation du lac de Grand-Lieu : la Boulogne ($S = 485$ km²) et l'Ognon ($S = 185$ km²).

5. Bassin versant de la Boulogne à l'exutoire ($S = 485 \text{ km}^2$). Quantiles de crues « simulés » (GR3J) et « transférés » (QdF).

7. Quantiles de crues du bassin versant intermédiaire de la Logne déduits des simulations par GR3J (1946-1990) et observés (1982-1989).

BOULOGNE A L'EXUTOIRE (LAC), $S=485 \text{ km}^2$

L'OGNON A L'EXUTOIRE (LAC), $S=185 \text{ km}^2$

6. Quantiles de crues instantanés maximaux des bassins versants non jaugés.

8. Modules annuels du bassin versant intermédiaire de la Logne déduits des simulations effectuées à partir de GR3J. Période 1946-1989.

10. Bilan hydrologique journalier du lac de Grand-Lieu

10.1. Introduction

La gestion actuelle du vannage de Bouaye (1,85 m à l'échelle de référence de Buzay) sur l'Acheneau, exutoire naturel du lac vers l'estuaire de la Loire, conduit à de fréquentes situations de sécheresse du lac qui bien entendu ont des implications socio-économiques et écologiques relativement graves. Pour remédier à cette situation le choix qui sera ultérieurement fait, entre divers scénarios de gestion du seuil de Bouaye, devra satisfaire, entre autres, à une cote minimale du lac assortie d'un risque de défaillance acceptable. La validité des résultats statistiques liés à ces simulations de gestion dépendra bien entendu du choix optimal de l'équation du bilan hydrologique du lac susceptible de rendre compte de l'effet de la gestion actuelle du seuil de Bouaye sur l'état de basses eaux observé du lac (1966-1984).

10.2. Equation optimisée du bilan journalier

L'équation de bilan optimisée (globalement (1946-1990) par approches successives) doit permettre de simuler, pour chaque année, l'étalement du creux (cotes et durée continue de « l'étiage » du lac) ainsi que la cote minimale annuelle du lac. La validation de l'équation optimisée portera essentiellement sur les cotes journalières non influencées par la gestion du seuil de Bouaye (cotes $\leq 1,85$ m) observées de 1966 à 1984.

L'équation du bilan hydrologique du lac peut s'écrire :

$$B(j) = B(j-1) + Q_{j\text{Ognon}} + Q_{j\text{Boulogne}} + P_{j\text{lac}} + \text{ETR}_{j\text{lac}} \quad (10)$$

où

$B(j)$ est le bilan au jour j (m^3),

$B(j-1)$ est le bilan de la veille (m^3),

$Q_{j\text{Ognon}}$ et $Q_{j\text{Boulogne}}$ sont les apports de débits journaliers, simulés par GR3J (1946-1990), des bassins versants d'alimentation.

La pluie journalière moyenne reçue par le lac ($P_{j\text{lac}}$) est déduite de la pluie locale enregistrée à la station météorologique de Nantes Bouguenais ($P_{j\text{NB}}$) par la relation suivante : $P_{j\text{lac}} = P_{j\text{NB}} * 0,8$

L'évapotranspiration réelle du lac ($\text{ETR}_{j\text{lac}}$) est déduite de l'évapotranspiration potentielle Penman ($\text{ETP}_{j\text{GR3J}}$) selon les relations saisonnalisées suivantes :

$$\text{ETR}_{j\text{lac}} = \text{ETP}_{j\text{GR3J}} \quad (\text{mois 10 à mois 3})$$

et

$$\text{ETR}_{j\text{lac}} = \text{ETP}_{j\text{GR3J}} * 1,3 \quad (\text{mois 4 à mois 9})$$

Nota : $\text{ETP}_{j\text{GR3J}}$ est calculée par le modèle GR3J, à partir de l'ETP Penman décadaire interannuelle mesurée à la station météorologique de Nantes Bouguenais, selon un algorithme de passage défini par EDIJATNO (1991).

L'infiltration n'apparaît pas dans le bilan car elle peut être, selon A. DURBEC (1992), considérée comme négligeable, par rapport aux autres termes, lors des crues et nulle lorsque le niveau du lac est stabilisé, comme en été par exemple où nous avons un équilibre nappe-lac.

10.3. Résultats

Pour pouvoir faire une certaine évaluation annuelle de la durée continue (en jours) de l'étiage du lac, nous nous sommes fixé une cote minimale annuelle du lac de 1,60 m (échelle de référence de Buzay). Pour toute cote égale ou inférieure à 1,60 m, nous considérons qu'il y a une journée de défaillance.

La figure 9, page suivante, récapitule les résultats relatifs à la gestion actuelle du seuil de Bouaye (cote maximale de 1,85 m), en particulier les cotes minimales annuelles ainsi que les durées cumulées de défaillances simulées (1946-1990) et observées (1966-1984). Nous pouvons constater, qu'en général l'expression (10) du bilan hydrologique permet de simuler pour chaque année une cote minimale et une durée d'étalement du creux acceptables. La bonne correspondance de l'étiage du lac observé pendant l'année 1976, particulièrement sévère, et simulé (extrait de la simulation continue 1946-1990), représentés à la figure 10, confirme l'adéquation de l'expression (10) du bilan hydrologique.

10. Lac de Grand-Lieu. Simulation de l'étalement du creux et de la cote minimale. Année 1976.

HYPOTHESE SUR LE VOLUME MAXIMAL DU LAC DE GRANDLIEU : 66.25 hm³
CORRESPONDANT A LA COTE (NGF NORMALISE) MAXI : 1.40 m (BUZAY(1.85)-0.45)

HYPOTHESE SUR LE VOLUME MINIMAL DU LAC DE GRANDLIEU: 53.71 hm³
CORRESPONDANT A LA COTE (NGF NORMALISE) MINIMALE : 1.15 m (BUZAY(1.60)-0.45)

ANNEES

	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67
V.D.C.S.	3.80	12.52	5.95	8.77	3.17	3.25	6.18	7.46	9.10	6.79	3.71	6.44	0.00	9.38	5.11	9.27	8.11	5.75	6.21	4.29	5.35	5.47
V.D.C.O.																					4.10	7.10
D.C.S.	94	172	86	107	80	69	86	101	135	135	82	102	0	116	80	98	111	105	95	107	61	91
D.C.O.																					45	118
V.M.S.	49.9	41.2	48.9	44.9	50.5	51.9	47.5	46.2	44.6	46.9	50.0	47.3	56.0	44.3	48.6	44.4	45.6	48.0	47.5	50.0	48.4	48.2
V.M.O.																					49.6	46.6
C.M.S. (BUZAY)	1.53	1.30	1.50	1.40	1.54	1.57	1.47	1.43	1.39	1.45	1.53	1.46	1.64	1.38	1.49	1.38	1.41	1.48	1.46	1.53	1.49	1.48
C.M.O. (BUZAY)																					1.52	1.44

ANNEES

	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
V.D.C.S.	1.29	7.27	6.47	4.71	7.82	3.76	5.97	7.67	15.01	0.00	10.13	7.66	9.35	4.38	6.76	3.75	4.73	7.39	8.08	8.68	2.32	13.22	0.00
V.D.C.O.	3.20	7.90	7.10	7.10	8.30	4.50	6.80	8.70	14.80		7.10	6.80	4.10	2.60	5.30	2.10	5.60						
D.C.S.	50	107	128	116	115	109	109	115	142	0	160	91	123	59	75	110	97	142	112	81	83	151	0
D.C.O.	57	126	115	173	147	104	122	131	146		130	97	38	41	55	81	93						
V.M.S.	52.4	46.4	47.2	49.0	45.9	49.9	47.7	46.0	38.7	54.0	43.6	46.0	44.6	49.3	46.9	50.3	49.0	46.3	45.6	45.0	51.4	40.5	44.8
V.M.O.	50.5	45.8	46.6	46.6	45.4	49.2	46.9	45.0	38.9		46.6	46.9	49.6	51.1	48.4	51.6	48.1						
C.M.S(BUZAY)	1.58	1.44	1.46	1.50	1.42	1.53	1.47	1.43	1*23	1.61	1.36	1.43	1.39	1.51	1.45	1.53	1.50	1.43	1.42	1.40	1.56	1.28	1.39
C.M.O(BUZAY)	1.54	1.42	1.44	1.44	1.41	1.51	1.45	1.40	1*24		1.44	1.45	1.52	1.55	1.49	1.56	1.48						

$$B(j) = B(j-1) + Q_j \text{ Ognon} + Q_j \text{ Boulogne} + P_j(\text{lac}) - E.T.R.j(\text{lac}) \quad (1)$$

APPORTS

$Q_j \text{ Ognon} + Q_j \text{ Boulogne}$ (mois 1 à mois 12)
 $P_j(\text{lac}) = P_j(\text{Nantes}) \cdot 0.8$ (mois 1 à mois 12)

SORTIE

$E.T.R.j(\text{lac}) = E.T.P.j(\text{modèle GR3})$ (mois 10 à mois 3)
 $E.T.R.j(\text{lac}) = E.T.P.j(\text{modèle GR3}) \cdot 1.3$ (mois 4 à mois 9)

V.D.C.S. = VOLUME DE DEFAILLANCE CUMULE SIMULE POUR CHAQUE ANNEE(hm³)
V.D.C.O. = VOLUME DE DEFAILLANCE CUMULE OBSERVE POUR CHAQUE ANNEE(hm³)
D.C.S. = DUREE CUMULEE DE DEFAILLANCE SIMULEE POUR CHAQUE ANNEE (j)
D.C.O. = DUREE CUMULEE DE DEFAILLANCE OBSERVEE POUR CHAQUE ANNEE (j)
V.M.S. = VOLUME MINIMAL SIMULE CHAQUE ANNEE (hm³)
V.M.O. = VOLUME MINIMAL OBSERVE CHAQUE ANNEE (hm³)
C.M.S. = COTE MINIMALE SIMULEE CHAQUE ANNEE A L'ECHELLE DE BUZAY (m)
C.M.O. = COTE MINIMALE OBSERVEE CHAQUE ANNEE A L'ECHELLE DE BUZAY (m)
1*24 = EXTRAPOLATION INFERIEURE DE LA COURBE V(COTE DU LAC)

E.T.R.j = EVAPOTRANSPIRATION REELLE DU LAC (mm)
E.T.P.j = EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE PENMAN (mm)
Pj = PLUIE DU JOUR J OBSERVEE AU POSTE (MN) DE NANTES (1/10 mm)
Qj = DEBIT DU JOUR J (m³/s)
Bj = BILAN DU LAC AU JOUR J (m³)

9. Validation de l'équation (1) du bilan hydrologique du lac de Grand-Lieu sur la période 1946-1990 (Echelle de référence de Buzay).

Conclusion générale

La modélisation des apports des bassins versants d'alimentation du lac de Grand-Lieu suivant deux approches hydrologiques différentes, modèle conceptuel global pluie-débit (GR3J) et modèle descriptif synthétique (QdF), a montré une grande cohérence des résultats obtenus tant au niveau des apports journaliers que des quantiles de crues établis pour différentes durées. Ces bons résultats, complétés par ailleurs par ceux obtenus pour le bassin versant diffus intermédiaire (hors tributaires principaux), nous permettent de valider les chroniques d'apport de débits

journaliers simulés (1946-1990) des bassins versants d'alimentation du lac de Grand-Lieu. La performance du modèle GR3J est sans doute aussi à associer au caractère peu hétérogène de la région du lac de Grand-Lieu tant au point de vue climatique, géologique, que de la couverture végétale, etc...

L'adéquation de l'expression (10) du bilan hydrologique à représenter l'étiage du lac de Grand-Lieu, dans les conditions actuelles de gestion, a permis (GALÉA 1990) de proposer un choix optimal de la cote du seuil de Bouaye pouvant admettre, avec une défaillance acceptable, une éventuelle évolution climatique avec plus d'années sèches.

Remerciements

Cette démarche hydrologique a pu être développée de manière satisfaisante grâce à l'existence de chroniques de mesures et d'outils de modélisation performants. Aussi, je remercie tout particulièrement :

— les services producteurs de données : Météo-France, le

Service régional d'aménagement des eaux, ainsi que le Syndicat d'aménagement hydraulique Sud-Loire pour leur collaboration.

— C. MICHEL et EDIJATNO (1989) pour leurs conseils et le remarquable outil de modélisation pluie-débit (1989) qu'ils ont développé ces trois dernières années et dont ils m'ont fait bénéficier pour cette étude.

Bibliographie

- GALÉA G. (1990). — *Lac de Grand-Lieu (Loire Atlantique), modélisation des apports et crues rares, bilan hydrologique, hypothèse de gestion et défaillances*. CEMAGREF-Lyon, Division Hydrologie - Hydraulique.
- Syndicat d'Aménagement Hydraulique Sud-Loire (1992). — *Lac de Grand-Lieu, causes de l'envasement et mesures de sauvetage, rapport de synthèse*. DDAF de Loire Atlantique (conducteur d'opération) ; Ministère de l'Environnement, Région des Pays de Loire, Département de Loire Atlantique (financement) ; Université de Rennes (SESLG), CEMAGREF (Lyon, Bordeaux), INSA et Ouest Aménagement de Rennes (prestataires).
- FAURE J.B., DURBEC A. (1992). — *Lac de Grand-Lieu, modélisation hydraulique, impact sur l'évacuation des crues d'une modification de la gestion du lac, rapport final 38 p.* CEMAGREF-Lyon, Division Hydrologie-Hydraulique.
- MICHEL C., EDIJATNO* (1989). — Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. CEMAGREF-Antony, Division Hydrologie ; (*) ENITRTS, Université Louis Pasteur Strasbourg. *La Houille Blanche* n° 2 1989.
- EDIJATNO (1991). — *Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier*. Thèse de doctorat Sciences et Techniques de l'eau (22.01.91), ENITRTS, Université Louis Pasteur Strasbourg. CEMAGREF-Antony, Division Hydrologie.
- GALÉA G., SCHUITEMA N.* (1989). — *Aménagement hydraulique rationnel, courbes débits-durées-fréquences, validation d'une formulation sur la région Bourgogne et extrapolations*. CEMAGREF Lyon, Division Hydrologie Hydraulique et (*) Landbouw Universiteit WAGENINGEN.
- LIXIN JIN*, GALÉA G. (1990). — *Modèles descriptifs synthétiques des connaissances régionales en crues, représentativité spatiale et domaine de validité*. CEMAGREF Lyon, Division Hydrologie Hydraulique ; (*) ENITRTS, Université Louis Pasteur Strasbourg.
- GALÉA G., SCHUITEMA* N., OBERLIN G. (1990). — *Modèle descriptif synthétique tri-dimensionnel des connaissances régionales en crues*. CEMAGREF Lyon, Division Hydrologie Hydraulique et (*) Landbouw Universiteit Wageningen ; *International symposium on regionalization in hydrology* April 23-26 1990 Ljubljana, Yugoslavia.
- CEMAGREF (1980). — *Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants, Fascicule 2 : la méthode « SOCOSE » ; SRAE, DIAME, SH, CTGREF, I.T. n° 38-2 (Juin 1980). Fascicule 3 : la méthode « CRUPEDIX » ; SRAE, DIAME, SH, CTGREF.*
- COLIN E., MICHEL C. et OBERLIN G. (1977). — *Application du calcul de la distribution d'une fonction de deux variables à l'estimation des crues*. BTGR n° 120, CTGREF-Antony.