

SOCIETE HYDROTECHNIQUE de FRANCE
199, rue de Grenelle - Paris VII°

COMMISSION pour l'ETUDE des DEBITS
Réunion du 21 Octobre 1969

APPLICATION d'un MODELE HYDROPLUVIOMETRIQUE à
l'EXPLOITATION d'un RESERVOIR de REGULARISATION
ELOIGNE de son POINT d'UTILISATION

par

C. ROCHETTE
Ingénieur à Electricité de France
IGECO - Division Hydrologie

ORSTOM Fonds Documentaire
N° : 33 390
Cote : B

La création d'un réservoir dans un bassin fluvial a pour but de régulariser son régime, c'est-à-dire de stocker une partie des apports durant les périodes d'abondance pour les restituer en saison sèche.

Les réservoirs ayant pour but une régularisation saisonnière, c'est-à-dire ceux pour lesquels le débit de régularisation est nettement inférieur au module peuvent être classés en deux catégories.

La première concerne les réservoirs situés à proximité immédiate du lieu d'utilisation. Leur exploitation pour la régularisation ne pose aucun problème même s'il y a des apports intermédiaires entre la réserve et l'utilisation comme c'est le cas d'un réservoir aménagé sur un affluent, lorsque l'utilisation se produit sur le cours principal à l'aval immédiat du confluent.

La seconde catégorie correspond aux réservoirs éloignés de leur point d'utilisation. Pour ces réservoirs, l'utilisation se produit très à l'aval et englobe des apports sauvages plus ou moins importants.

Leur exploitation pose le problème de la prévision des apports provenant du bassin versant intermédiaire. Elle s'accompagne de pertes d'eau plus ou moins importantes liées à la précision de la prévision, pertes d'eau dont la détermination est essentielle étant donné qu'elle conditionnent le débit d'équipement que la réserve constituée permettra d'assurer.

La division hydrologique de l'IGECO a eu l'occasion d'étudier ces problèmes à propos d'un aménagement en cours de réalisation au CAMEROUN. Ces études nous ont permis de mettre au point une méthodologie comportant au départ l'établissement d'un modèle hydropluviométrique. Cette méthodologie permet d'établir, à partir des observations pluviométriques, le programme des lâchures à effectuer à l'ouvrage de régularisation. Elle permet également de déterminer les possibilités de régularisation relatives à de tels aménagements.

Nous nous proposons, à l'occasion de cette réunion, de vous faire part de l'expérience que nous avons acquise dans ce domaine en prenant comme exemple le cas de l'aménagement précité qui a pour objet la régularisation de la SANAGA à EDEA.

1. EXPOSE du PROBLEME de la REGULARISATION de la SANAGA à EDEA

L'aménagement consiste en un réservoir implanté à M'BAKAOU sur le DJEREM, affluent de la SANAGA drainant la partie nord-est du bassin. Il a pour but de régulariser la production de la centrale d'EDEA située sur la basse SANAGA et fonctionnant au fil de l'eau.

Le réservoir doit être exploité de façon à assurer pendant la période de basses eaux le débit d'équipement de la centrale qui est de $600 \text{ m}^3/\text{s}$.

La majeure partie de l'énergie produite par la centrale d'EDEA - soit 105 MW sur 125 - sert à alimenter une usine électrométallurgique exploitée à EDEA par la Société ALUCAM et c'est pour tenter de satisfaire en permanence les besoins en énergie de cette usine que la régularisation a été envisagée et doit intervenir à partir de Janvier 1970.

Une caractéristique essentielle du complexe ALUCAM est qu'il s'accommode mal des restrictions de fourniture d'énergie, qu'elles soient progressives et prolongées, comme c'est le cas actuellement en période de basses eaux, ou bien accidentelles et temporaires comme cela risque d'être le cas à l'avenir si, procédant à la régularisation, on ne prend pas une marge de sécurité suffisante pour pallier les erreurs inévitables de prévision, prenant ainsi le risque de voir le débit à EDEA descendre en dessous du débit de régularisation adopté. En effet, toute restriction de

fourniture de courant, dès que sa durée dépasse quelques heures, nécessite d'arrêter des cuves, en nombre proportionnel à la chute de puissance constatée. Ces arrêts de cuve ont de graves incidences sur l'exploitation ALUCAM car le fait d'arrêter une cuve la détériore. Il en résulte des frais de réfection élevés et un délai assez long pour sa remise en service. Cette considération est très importante car elle impose à la régularisation une condition particulièrement sévère, à savoir que le débit à EDEA pendant toute la période de régularisation ne descende pas en dessous du débit d'équipement prévu. Précisons toutefois qu'un recours à des moyens de production thermique peut s'envisager pour compenser la chute de puissance correspondant à des déficits de régularisation inférieurs à un certain débit q_0 .

Ces précisions étant données, revenons à l'aménagement proprement dit pour en donner les caractéristiques.

La capacité du réservoir de M'BAKAOU est de 2,3 milliards de m^3 . L'eau provenant de cette réserve effectue un parcours de 640 km pour parvenir à EDEA et on a estimé à 6 jours le temps de transport entre M'BAKAOU et EDEA.

La superficie du bassin total à EDEA est de 135 000 km^2 . Celle du bassin du DJEREM à M'BAKAOU est de 20 400 km^2 .

Toute l'économie de l'aménagement repose finalement sur la qualité des prévisions qui seront émises 6 jours à l'avance des débits provenant du bassin intermédiaire.

L'application à l'exploitation de la réserve d'une méthode de prévision quelle qu'elle soit conduira, si on n'adopte aucune marge de sécurité, à un débit régularisé variant de part et d'autre du débit de régularisation prévu. Il en résultera des pertes d'exploitation lorsque le débit prévu est inférieur au débit qui sera effectivement observé et des déficits de régularisation dans le cas contraire.

L'adoption d'une marge de sécurité destinée à pallier les déficits de régularisation aura obligatoirement pour effet d'accroître les pertes d'exploitation. Ce sont ces pertes d'exploitation qu'il convient de déterminer si on veut définir les possibilités réelles de régularisation offertes par la réserve. Ces dernières s'expriment par le temps de retour des défaillances de la réserve correspondant au débit de régularisation prévu.

Dans le cas présent, comme nous l'avons déjà mentionné, on peut envisager de faire appel aux moyens de production thermiques pour compenser les déficits de régularisation. Mais il faut étudier si ce recours se justifie du point de vue économique. Pour cela on doit déterminer les possibilités de régularisation dans les deux cas suivants :

- celui où la marge de sécurité est adoptée de manière à éviter, avec une très forte probabilité, les déficits de régularisation ;
- celui où on envisage qu'elle entraîne des déficits inférieurs à une valeur q_0 , valeur correspondant aux possibilités de dépannage à partir des centrales thermiques.

Finalement, on est amené, pour résoudre les problèmes posés par l'exploitation de la réserve, à effectuer les opérations successives suivantes :

1. Mise au point d'un modèle hydropluviométrique testé sur une série d'années (1951-69) et applicable au bassin versant total.
2. Application de ce modèle à la prévision 6 jours à l'avance des débits du bassin versant intermédiaire (bassin total moins bassin de M^rBAKAOU), cette prévision devant ensuite servir à la détermination des lâchures suivant des règles à définir.
3. Application du modèle à la simulation des prévisions des apports du bassin versant total pendant la période de référence (1951-69) et établissement des conditions d'exploitation de la réserve (pertes d'eau) et des conditions de régularisation (déficits) qui découlent de ces prévisions.
4. Compte tenu des résultats précédents, étude des corrections à faire subir aux prévisions en considérant 2 systèmes de correction :
 - l'un destiné à supprimer les déficits de régularisation,
 - l'autre destiné à les réduire à la valeur maximale admise.
5. Détermination des risques de défaillance de la réserve résultant des modes d'exploitation correspondant à l'utilisation de ces 2 systèmes de correction.
6. Choix du mode d'exploitation le meilleur entraînant la décision de faire appel ou non aux moyens de production thermiques. Prise en compte de ce choix et du système de correction correspondant pour la détermination des lâchures.

Nous allons décrire ces différentes opérations.

2. DESCRIPTION des DIFFERENTES OPERATIONS

2.1. - Mise au point du modèle hydropluviométrique

Nous ne ferons pas une description détaillée du modèle qui a été établi. Nous disons seulement qu'il est basé sur la décomposition du bassin en zones isochrones et qu'il permet de tenir compte de la façon la plus fine possible de la distribution spatiale des précipitations et de l'hétérogénéité du bassin du point de vue sol et végétation. Ce modèle est d'abord établi pour s'appliquer au bassin versant total de la SANAGA à EDEA. On dispose sur ce bassin d'une information hydrométrique relative à la station à EDEA et d'une information pluviométrique couvrant une période commune de 19 années (1951-69).

Ce modèle a fait l'objet d'un programme de passage sur ordinateur. Son réglage a été réalisé par le Centre de Calcul du SEGN (Service d'Etudes Générales Nucléaires de CLAMART) à l'aide d'un programme d'optimisation. En fait, deux réglages ont été réalisés, l'un correspondant à l'utilisation par le modèle des données de 24 pluviomètres, l'autre correspondant au cas où le modèle utilise les données de 61 pluviomètres (cas des années 1968 et 1969).

Au stade de l'exploitation, il est prévu d'utiliser uniquement les stations synoptiques, c'est-à-dire 13 pluviomètres.

Des essais effectués sur la période 1960-69 ont montré que le modèle réglé en vue de son utilisation avec un réseau de 24 pluviomètres pouvait être utilisé avec le réseau de 13 pluviomètres.

Précisons enfin que ce modèle reconstitue les débits journaliers en calculant jour par jour les composantes de ce débit, à savoir le débit correspondant aux apports souterrains, débit que nous convenons d'appeler débit de base et le débit correspondant au ruissellement. La reconstitution des débits s'effectue à partir des précipitations en ignorant totalement les débits observés. La seule donnée hydrométrique nécessaire à cette reconstitution est le débit de base du premier jour de la période sur laquelle le modèle est utilisé (début Janvier à fin Mai). La détermination du débit de base du premier jour est relativement aisée puisque ce jour se situe au début de la période de tarissement.

2.2. - Application du modèle à la prévision

2.2.1. - Application du modèle à la prévision 6 jours à l'avance des apports provenant du bassin entier

Cette application est destinée à fournir une première idée des conditions interannuelles d'exploitation de la réserve.

Utiliser le modèle comme moyen de prévision revient à l'appliquer à une période égale à l'échéance de la prévision en introduisant pour chaque opération de prévision le débit de base du jour où la prévision est émise, ce qui conduit à faire intervenir le débit observé.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour déterminer le débit de base au jour J :

- a) Retrancher du débit observé le débit ruisselé calculé par le modèle.
- b) Utiliser une formule de récurrence de la forme :

$$Q_B (J) = \left[Q_B (J - 1) + \tau (Q (J - 1) - Q_B (J - 1)) \right] e^{-K}$$

avec une convention particulière pour le cas où le débit de base viendrait à dépasser le débit observé.

C'est cette deuxième méthode que nous avons adoptée en prenant pour τ la valeur 0,08. Avec la première méthode, les débits de base initiaux, correspondant à des prévisions successives fluctuent autour d'une courbe normale et ces fluctuations se répercutent sur les prévisions.

Un programme de calcul de prévision a été établi et appliqué à la période 1962-69 en considérant uniquement le cas du réseau des 13 pluviomètres et en faisant l'hypothèse de l'absence de précipitations les jours suivant celui où la prévision est émise. La routine de calcul est la suivante : prise en compte du débit de base du jour J en utilisant la formule indiquée plus haut et les pluies observées jusqu'au jour J inclus, calcul du débit au jour J + 6 au moyen du modèle avec précipitations nulles du jour J + 1 au jour J + 6. L'opération est répétée jour après jour tout au long de la période considérée (1er Janvier - 31 Mai).

2.2.2. - Application du modèle à la prévision 6 jours à l'avance des apports du bassin versant intermédiaire et détermination des lâchures

L'opération de prévision journalière répétée dans le programme décrit ci-dessus est celle qui sera utilisée en pratique pour l'exploitation du réservoir à la seule différence que la prévision concernera alors les apports du bassin versant intermédiaire. Il suffit pour cela de remplacer dans le programme d'élaboration de la prévision les données relatives au bassin versant entier par celles relatives au bassin versant intermédiaire. Les modifications à faire subir aux données pour passer d'un bassin à l'autre portent sur les surfaces isochrones (suppression et réduction d'un certain nombre d'entre elles) et sur le réseau pluviométrique (suppression d'un pluviomètre). C'est d'ailleurs un avantage du modèle hydropluviométrique utilisé qu'il permette de faire abstraction de telle ou telle partie du bassin et qu'on puisse l'appliquer, sans rien changer au programme de calcul, au bassin ainsi diminué.

L'élaboration, à l'aide du modèle, de la prévision des apports provenant du bassin versant intermédiaire nécessite la connaissance de ces apports à la station d'EDEA, le jour de l'émission de la prévision. Or ce débit ne peut être observé directement étant donné qu'il se superpose au débit provenant de la réserve. Il ne peut être obtenu qu'en faisant la différence entre le débit observé à EDEA et le débit provenant de la réserve ce qui pose le problème de la propagation des débits entre M^oBAKAOU et EDEA. Cette propagation se traduit par une déformation de l'hydrogramme entre M^oBAKAOU et EDEA. Pour la représenter on a utilisé la méthode de MUSKINGUM qui est basée sur la conservation des volumes écoulés et fait intervenir le stockage dans le bief.

Disposant sur la SANAGA de données hydrométriques à deux stations intermédiaires, on a déterminé, à l'aide d'un programme de passage à l'ordinateur, les coefficients des formules de propagation applicables au bief M^oBAKAOU-EDEA en le considérant formé de 3 tronçons.

Les coefficients obtenus sont les suivants :

	C_0	C_1	C_2
1er tronçon	0,229	0,230	0,541
2ème tronçon	0,299	0,300	0,401
3ème tronçon	0,066	0,576	0,490

La détermination des lâchures à effectuer à M^oBAKAOU le jour J pour que ces lâchures à leur arrivée à EDEA le jour J + 6 correspondent exactement à l'appoint désiré (débit de régularisation moins le débit prévu pour les apports du bassin versant intermédiaire), pose le problème inverse de celui de la propagation, problème consistant à déterminer l'hydrogramme à M^oBAKAOU en fonction de l'hydrogramme aval désiré ($Q_R = Q \text{ prévu}(t)$). Or, cela n'est possible que lorsque l'hydrogramme aval est prédéterminé, ce qui n'est évidemment pas le cas ici. En conséquence, on ne pourra pas adopter d'autre règle pour procéder aux lâchures à M^oBAKAOU que celle consistant à lâcher, au jour J, un débit égal au débit d'appoint fixé par la prévision des apports du bassin intermédiaire qui arriveront à EDEA le jour J + 6.

En adoptant cette règle, on néglige les déformations que subit l'hydrogramme des lâchures entre M^oBAKAOU et EDEA et on commet une erreur sur le débit que ces lâchures engendreront à EDEA. L'erreur commise aura des effets tantôt favorables, tantôt défavorables vis-à-vis des déficits de régularisation et des pertes d'exploitation, mais ces effets seront très limités car l'erreur commise est faible par rapport aux erreurs de prévision des apports du bassin versant intermédiaire.

2.3. - Résultats de l'exploitation simulée de la réserve

Revenons aux résultats obtenus à l'aide du programme de prévision 6 jours à l'avance des débits du bassin entier avec l'hypothèse de précipitations nulles du jour J + 1 au jour J + 6. Ce programme appliqué aux 8 dernières années fournit les prévisions relatives à cette période et détermine les pertes d'exploitation et les déficits de régularisation qu'on aurait enregistrés si on avait utilisé ces prévisions en vue d'une régularisation au débit de 600 m³/s. Les calculs sont faits sur la base d'un débit de lâchure au jour J égal à l'écart à 600 m³/s du débit prévu au jour J + 6, c'est-à-dire en supposant que le transfert de l'hydrogramme des lâchures entre M^{BAKAOU} et EDEA équivaut à une translation (hydrogramme décalé de 6 jours). Les résultats de cette exploitation simulée sur les 8 dernières années sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

Années	Déficits enregistrés (m ³ /s)					Pertes d'exploitation (10 ⁶ m ³)	Durée de la régularisation (jours)
1962	35					364	84
1963	130	100				147	40
1964	45	18	60	30		231	81
1965	19	58	78			343	78
1966	30	30				381	98
1967	13	59	18	156	119	389	119
1968	30	30				290	94
1969	5					229	46

On constate que les déficits de régularisation sont très variables d'une année à l'autre et se produisent de façon aléatoire.

Les déficits de régularisation et les pertes d'exploitation sont presque entièrement imputables à l'imperfection du modèle étant donné qu'on n'a pas adopté de marge de sécurité autre que celle, variable, donc assez inopérante, résultant de l'hypothèse de précipitations nulles du jour J + 1 au jour J + 6. On a d'ailleurs déterminé quelle était la marge de sécurité introduite par cette hypothèse. Un programme de calcul de prévision effectué en tenant compte des précipitations observées du jour J + 1 au jour J + 6, donc supposées connues à l'avance, a été établi et appliqué aux années 1965 et 1967.

Les résultats pour ces 2 années s'établissent comme suit :

Années :	Déficits enregistrés (m ³ /s)							Pertes d'exploitation (10 ⁶ m ³)
1965 :	26	59	86	7				255
1967 :	13	59	15	22	157	24	119	291

Ces résultats, si on les compare aux précédents, montrent que le fait d'admettre des précipitations nulles du jour J + 1 au jour J + 6 a pour effet, par rapport au fait de les supposer connues à l'avance :

- a) de supprimer un certain nombre de déficits de régularisation. Dans le cas des deux années traitées, il se trouve que cette suppression concerne les déficits les plus faibles mais on peut penser que pour d'autres années ce seront les déficits les plus forts qui seront réduits, voire supprimés ;
- b) d'accroître sensiblement les pertes d'exploitation.

Ces effets étaient prévisibles et s'expliquent comme suit :

Etant donné qu'on suppose des précipitations nulles dans l'intervalle J + 1, J + 6, les erreurs de prévisions qui sont à l'origine des déficits de régularisation (et des pertes d'exploitation) varient dans les limites d'imprécision du modèle si, pour la période de 6 jours étudiée, cette hypothèse des précipitations nulles est confirmée. Par contre, si cette hypothèse est infirmée, le débit prévu sera sous-estimé et il en résultera, par rapport à la situation précédente, des déficits de régularisation moindres et des pertes d'exploitation plus élevées.

Comme au cours de la régularisation l'hypothèse faite est tantôt confirmée, tantôt infirmée, son introduction conduit à sous-estimer les débits prévus dans certains cas et à ne pas le faire dans d'autres cas, ce qui montre que la marge de sécurité introduite par cette hypothèse est variable. Pour que la réduction des déficits de régularisation soit systématique, il faut faire subir aux débits prévus, obtenus avec l'hypothèse des précipitations nulles, une correction consistant en une réduction variant en raison inverse de la hauteur des précipitations qui se produiront dans l'intervalle J + 1, J + 6, ce qui pose le problème de leur prévision.

2.4. - Corrections à apporter aux prévisions pour supprimer ou réduire les déficits

Le débit de lâchure Q_L se déduisant du débit prévu Q_P au moyen de la relation $Q_L = 600 - Q_P$, les expressions correction de prévision et correction de lâchures ont la même signification. Nous n'utiliserons désormais que l'expression correction de prévision.

Les résultats de l'exploitation simulée de la réserve montrent que certains déficits se produisent pendant la période de tarissement pur.

Ces déficits se produisent les années pour lesquelles le coefficient de tarissement est supérieur à la moyenne. Cela provient du fait qu'on a adopté dans le modèle une valeur moyenne pour ce coefficient. L'amplitude de ces déficits est toujours faible. Les corrections à appliquer aux débits prévus pendant cette période procèdent d'autres considérations que celles concernant les corrections à appliquer aux prévisions émises en dehors de cette période. On applique, pour corriger les débits prévus pendant la période de tarissement, la formule :

$$\Delta Q_P (J + 6) = Q_P (J) \left[e^{-6k_2} - e^{-6k_1} \right] = - 0,078 Q_P (J)$$

(k_1 étant le coefficient de tarissement du modèle et k_2 le coefficient de tarissement maximal observé).

Les déficits se produisant en dehors de la période de tarissement sont dus à l'imperfection du modèle.

Si les prévisions élaborées par le modèle étaient faites en tenant compte des précipitations survenant dans l'intervalle $J + 1, J + 6$; hypothèse correspondant à celle d'une prévision quantitative parfaite des précipitations, la correction à faire subir aux débits prévus pour réduire les déficits de régularisation consisterait obligatoirement à retrancher à ces débits un débit déterminé, car il serait nécessaire d'adopter une marge de sécurité uniforme.

Etant donné que les prévisions ont été élaborées dans l'hypothèse de précipitations nulles du jour $J + 1$ au jour $J + 6$, on est amené à adopter une marge de sécurité liée à la hauteur des précipitations qui sont susceptibles de se produire dans l'intervalle $J + 1, J + 6$, cette marge de sécurité variant en raison inverse de cette hauteur de précipitations.

On peut espérer ainsi réduire les déficits de régularisation en augmentant le moins possible les pertes d'exploitation.

La méthode de correction que nous avons adoptée permet de tenir compte d'une manière indirecte et globale des précipitations à venir en utilisant comme indice des précipitations à venir la position journalière du FIT.

L'utilisation du FIT comme indice des précipitations à venir est justifiée par l'existence de corrélations entre la position du FIT à une date donnée et la hauteur moyenne sur le bassin des précipitations se produisant les jours suivants.

La formule adoptée pour corriger les débits prévus en dehors de la période de tarissement est :

$$\Delta Q_p = A (Z - Z_0)$$

A et Z_0 étant 2 paramètres de réglage et Z la position journalière du FIT définie par sa latitude en degrés sur le méridien de TIBATI qui passe par le centre du bassin.

Un programme destiné à fixer les valeurs de A et de Z_0 conduisant dans les 2 cas considérés (déficits nuls et déficit maximal 90 m³/s) aux pertes d'exploitation minimales est en cours d'établissement.

Dans ce programme d'optimisation, la période de tarissement pendant laquelle les débits prévus font l'objet d'une correction spéciale, définie précédemment, est détectée par la position maximale du FIT et par l'évolution des débits prévus qui caractérisent cette période, soit :

$$Z < 6^\circ$$

et

$$Q_p (J) > 0,985 \times Q_p (J - 1)$$

Lorsque nous serons en possession des résultats de cette optimisation, nous pourrons déterminer le risque de défaillance de la réserve correspondant aux 2 modes d'exploitation considérés, ce qui permettra à la Société qui va exploiter la réserve de décider si elle envisage ou non de recourir aux possibilités de dépannage à partir des centrales thermiques. Nous serons également en mesure, quelle que soit sa décision de fournir à cette Société le programme de passage à l'ordinateur à utiliser pour l'élaboration des prévisions journalières et les règles permettant, à partir de ces prévisions et de la position du FIT, de déterminer les lâchures journalières à effectuer à M^{BAKAOU}.