

CONDITIONS REQUISES DE L'OBSERVATION DES BARRAGES RÉSERVOIRS EN RÉGION INTERTROPICALE POUR FOURNIR UNE BONNE ESTIMATION DES TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE

Pierre DUBREUIL

(France)¹

RÉSUMÉ

Cette étude a été effectuée sur des renseignements provenant du Nord-Est du Brésil (polygone de la sécheresse).

De l'examen des relevés périodiques de niveaux, totalisant plus de 200 stations-années, sur 12 réservoirs de capacités variables, on a pu constater la difficulté d'obtenir une bonne estimation des apports du bassin versant : pluie, infiltration, prélèvements pour irrigation ... etc ... étant généralement mal connus.

L'observation journalière pendant 2 années des éléments constitutifs du bilan d'un réservoir de 2 millions de m³ a montré que l'évaporation ne pouvait en être déduite en saison d'écoulement qu'en moyenne par périodes de 15 jours—5 jours dans les meilleures conditions. Pour cela, il faut connaître les débits entrant et sortant, la pluie et la variation du plan d'eau avec une très bonne précision si l'on veut que l'estimation de l'évaporation se fasse à moins de 50% près.

ABSTRACT

Conditions of pools observations required in the intertropical region to obtain a good estimation of the main terms of the hydrological balance

This work was made with data from the semi-arid north-eastern region of Brazil. From more than 200 stations-years of pool level records at 12 reservoirs of various storage capacities, it was very difficult to obtain the drainage basin inflows with a good accuracy: rain, infiltration and irrigation requirements... being generally not well known.

During two years, the daily records of the main terms of the hydrological balance in a 2 millions cubic meters storage reservoir has shown that the rainy season evaporation on free water surface could be only estimated for 15 days-period—5-days-periods under the best conditions. For that, it is necessary to know with a good accuracy inflows, outflows, rain and pool level variations, if an evaporation estimation is needed with an error less than 50 per cent.

Dans un pays en voie de développement, l'information disponible pour la connaissance des ressources en eau n'est généralement pas très abondante et l'utilisation des relevés de niveau d'eau dans des réservoirs, pour pallier l'insuffisance du réseau hydro-métrique, constitue une possibilité non négligeable d'accroissement de cette information.

Dans une région intertropicale, la ressource en eau est souvent un facteur limitant du développement; les objectifs d'une saine politique d'emménagement des eaux de surface et de l'optimisation de la gestion de réservoirs demandent que l'on étudie avec soin le fonctionnement de tels réservoirs et leur influence sur le bilan hydrique régional.

Confronté avec ces deux problèmes, nous avons pu constater qu'il existait une valeur minimale de l'information susceptible d'être extraite d'une chronique de niveaux d'eau de réservoirs pour l'estimation des termes du bilan hydrique, les niveaux n'ayant pas été réellement observés dans cette optique « réseau »; nous avons constaté également que certaines améliorations pourraient accroître notablement cette information jusqu'à une valeur maximale fort intéressante bien que d'une précision encore modeste quant à la préhension de certains termes du bilan hydrique (évaporation).

¹ Directeur de recherches à l'ORSTOM.

Cette confrontation s'est opérée pratiquement à l'occasion de l'inventaire des ressources en eau et de l'étude d'aménagement intégré du bassin du Jaguaribe, bassin côtier du polygone de la sécheresse au Nord-Est du Brésil (6° de latitude Sud, 40° de longitude Ouest, état du Ceará) grand de 70 000 km². En dehors de la température et de l'humidité gardant des valeurs propres à la zone équatoriale maritime, les autres aspects du climat régnant sont fortement modifiés dans le sens de l'aridité. Le régime des pluies très irrégulier est concentré sur 5 mois; l'écoulement résultant, sur des terrains en majorité cristallins imperméables, est encore plus irrégulier, saccadé et violent durant la même période, faisant place à un tarissement complet le reste de l'année. Le régime hydrologique est donc du type tropical mais avec une irrégularité excessive de tendance sub-désertique parfois. En effet, si pour 50% des années, l'écoulement dure entre 3 et 6 mois seulement, on observe en moyenne 10% des années sans aucun écoulement. La chronique des écoulements annuels est très dissymétrique; les coefficients de variation des modules se situent entre 1 et 1,50. Avec une pluviosité moyenne interannuelle de 600 à 800 mm, on obtient des modules moyens de 50 à 80 mm, mais les médianes ne valent que 20 à 40 mm et les déciles évoluent pour l'inférieur entre 3 et 8 mm et pour le supérieur entre 90 et 150 mm. Les crues violentes qui constituent la majeure part de l'écoulement provoquent des mouvements importants des alluvions sableuses des lits : la plupart des stations hydrométriques sont à fond mobile.

C'est peut-être là le seul grand avantage du réservoir, comme élément du réseau hydrométrique, d'introduire une stabilité de longue durée dans l'établissement hauteurs-débits.

1. LE RÉSERVOIR, ÉLÉMENT D'APPOINT DU RÉSEAU HYDROMÉTRIQUE

Pour le bassin du Jaguaribe, le réseau hydrométrique classique comprend 12 stations de plus de 15 ans de service, totalisant 430 stations années, dont les 2/3 seulement (290) ont été considérées comme valables; le déchet est imputable aux défauts d'observations et surtout à la mobilité des lits inhibant l'établissement d'une bonne transformation hauteur-débit pour les années au cours desquelles une campagne de jaugeages n'a pas été effectuée. En parallèle, on trouve pour 7 des 9 réservoirs construits et gérés par l'Administration depuis plus de 15 ans, un total de 175 stations années, chroniques elles aussi exploitables en partie seulement, mais pour d'autres raisons.

L'exploitation de ces chroniques dans leur partie relative à la saison sèche permet une excellente approche de l'évaporation, comme le montre G. GIRARD dans une autre communication. Nous nous attacherons ici seulement à la partie relative à la saison des pluies. Certains termes du bilan hydrique disparaissent ou deviennent négligeables (cf 2.) ce qui permet l'écriture simplifiée :

$$\Delta V = Q_E + P - (Q_S + E) \quad (1)$$

La chronique fournit uniquement des niveaux d'eau. La transformation de ces niveaux en volumes accumulés (puis en débits exprimés en m³/s, ou en mm sur le bassin versant) dans la retenue se fait aisément à l'aide de la courbe de cubature de cette dernière. Pour les réservoirs considérés ici, dont les capacités maximales s'échelonnent de 7 à 125 millions de m³, cette transformation se fait avec une précision d'au moins 2% si les niveaux sont lus au centimètre près; mais les lectures disponibles sont hélas seulement de 5 ou de 10 en 10 centimètres; la précision est alors fortement atténuée. La gêne considérable à l'échelle d'une courte période diminue à l'échelle du mois ou de l'année, c'est-à-dire quand la fluctuation ΔV s'amplifie suffisamment. Cette imprécision de la lecture des niveaux d'eau ne permet pas de descendre en dessous de l'échelle du mois. La connaissance des apports (ou débits d'entrée Q_E), qui est

l'objectif, s'obtient alors en considérant la formule (1) sous la forme suivante :

$$Q_E = \Delta V - P + (Q_S + E) \text{ (1bis)}$$

Des trois termes correctifs de ΔV , deux s'évaluent sans trop de difficulté :

— P la pluie tombée sur la retenue, estimée égale à celle que recueille le pluviomètre installé au site du barrage;

— E l'évaporation sur le plan d'eau, estimée égale à celle indiquée par le bac flottant, ou le bac de classe A affecté d'un terme de réduction.

Tous les barrages étudiés disposent d'un pluviomètre et d'un bac flottant à proximité. Ce sont deux conditions indispensables à l'exploitation de la chronique.

Malgré cela, l'imprécision relative sur le choix de P et de E altère quelque peu la qualité de la chronique transformée en volumes. De celle-ci, on ne peut en effet pas obtenir d'information précise sur les points suivants :

— dates du début et de la fin de l'écoulement, débits des mois correspondants pour lesquels les apports sont encore faibles vis-à-vis de E ;

— forme des hydrogrammes de crue (durée de l'écoulement et débit de pointe).

La chronique des volumes, ou des débits, offre donc seulement une bonne estimation de l'apport annuel et une image d'autant plus fidèle des apports mensuels que ceux-ci sont conséquents tout en ne permettant pas une bonne définition de la durée totale de l'écoulement.

Ce résultat minimal, somme toute satisfaisant, est presque annulé si le terme Q_S n'est pas nul, c'est-à-dire s'il y a des déversements.

En effet, l'appréciation du centimètre est nécessaire dans l'estimation de la charge sur le déversoir pour obtenir un débit point trop aberrant, en appliquant la courbe de tarage du projet. C'est en effet le seul élément généralement disponible; il ne s'agit d'ailleurs que d'une application de formule extraite d'un manuel d'Hydraulique, le tarage sur le modèle réduit et son contrôle a posteriori par jaugeages restant des exceptions ici rarissimes. Il y a lieu également de se méfier des modifications (variations de la cote du seuil ou de la largeur du déversoir) que le projet aurait pu subir lors de l'exécution des travaux pour des motifs techniques ou économiques.

La conclusion de l'examen des chroniques de niveaux d'eau des réservoirs est alors simple : l'information n'est valable que dans la mesure où l'ouvrage ne déverse pas ou peu. On a de la sorte dû éliminer tous les réservoirs de faible capacité déversant chaque année ou presque. L'évaluation de la capacité maximale d'emmagasinement en terme de lame écoulée annuelle sur le bassin versant fournit une bonne appréciation de la qualité d'information à espérer. Il faut au moins que cette lame soit égale au module moyen (déversement 1 année sur 3); si elle atteint 3 fois le dit module (déversement 1 année sur 10) la chronique correspondante vaut une bonne station du réseau hydrométrique.

Sur les 175 années disponibles dans l'exemple choisi, on a ainsi pu valider plus de 110 années, la meilleure chronique étant fournie par le réservoir de Cedro (125 millions de m³) dont la capacité équivaut à 600 mm, soit plus de 7 fois la lame écoulée moyenne (3 déversements en 54 ans).

2. POUR UNE ESTIMATION FINE DU BILAN HYDRIQUE D'UN RÉSERVOIR

Si l'inventaire des ressources en eau peut à la rigueur se satisfaire de l'appoint d'information des chroniques de niveaux d'eau précédentes, la formulation d'une gestion optimale d'un réservoir demande plus de précision. Ce problème de gestion concernait, dans le bassin du Jaguaribe, surtout les retenues de moyenne capacité à usage agricole prépondérant. Nous avons abordé sa résolution sur le plan hydrologique en étudiant durant 2 années — 1964 et 1965 — la retenue d'Arace (39° W - 5° S sur

un sous-affluent du Jaguaribe) qui derrière une digue en terre de 11 mètres peut accumuler 2 870 000 m³ (plan d'eau maximal de 854 000 m²) à la côte du seuil du déversoir.

Le dispositif d'observations mis en place en 1964 était le suivant :

- contrôle des niveaux du réservoir par une échelle à division centimétrique lue 2 fois par jour en saison des pluies, et plus souvent lors du passage des crues;
- contrôle des débits déversés par étalonnage du déversoir (seuil épais de 44 m de large) à l'aide de jaugeages au micro-moulinet;
- contrôle des débits d'irrigation par comptage des durées d'ouverture des vannes du siphon de prise d'eau et étalonnage du débit prélevé en fonction de la retenue;
- contrôle de la pluie par 2 pluviomètres situés l'un sur le barrage, l'autre en amont de la retenue;
- contrôle des apports à partir de la station Cachoeira d'un bassin représentatif d'études situé en amont de la retenue et qui couvre 19,2 km² soit 83% du bassin total alimentant la retenue (23,3 km²).

Le bilan hydrique du réservoir comprend 3 postes à l'actif et 4 postes au passif:

a) A l'actif :

- les apports pluviaux P ;
- les débits entrant provenant de la station Cachoeira Q_C ;
- les débits entrant provenant du bassin direct de la retenue en aval de cette station Q_{AC} .

b) Au passif :

- les déversements Q_D ;
- l'irrigation et l'alimentation des populations et du bétail U ;
- l'évaporation E ;
- l'infiltration I .

P et Q_C sont très bien connus; en admettant que Q_{AC} est proportionnel à Q_C dans le rapport des surfaces ($Q_C + Q_{AC} = 1,21 Q_C$) on ne commet par une erreur supérieure à $\pm 5\%$ si Q_C est connu à $\pm 2\%$, l'hypothèse ne pouvant introduire au plus qu'une imprécision de $\pm 20\%$ sur l'estimation de Q_{AC} .

L'irrigation est bien connue; la consommation des populations (150 personnes) et du bétail (875 unités gros bétail) représente un terme négligeable : 1350 m³ par mois soit à peine 1,5% du total évaporé et 4 à 5% du volume pour les irrigations.

Bâtie sur terrains cristallins, la retenue, colmatée par les apports fins du débit solide, est pratiquement imperméable et le terme infiltration est négligeable.

L'équation générale du bilan peut s'écrire : entrées = sorties aux variations de stock près soit :

$$1,21 Q_C + P = Q_D + E + U \pm \Delta V \quad (2)$$

En saison sèche, sans déversement, l'équation se simplifie ainsi

$$1,21 Q_C + P = E + U \pm \Delta V$$

On peut aisément en expliciter l'évaporation, le premier terme étant négligeable ou nul, au seul examen des variations de niveau après correction des prélèvements utilitaires :

$$E = |\Delta V| - U$$

En période pluvieuse, avec déversement, c'est seulement le terme U qui devient négligeable ou nul et l'estimation directe de l'évaporation s'obtient en faisant :

$$E = 1,21 Q_C + P - Q_D \pm \Delta V$$

Tant qu'il n'y a pas de déversement, le bilan est correct car ΔV s'apprécie à 2% près avec une lecture au centimètre du niveau de la retenue.

Malgré l'étalonnage par jaugeages au micro-moulinet, la connaissance des débits déversés est imprécise surtout parce que les niveaux d'eau ne sont pas suivis régulièrement (2 points par jour) durant les périodes de crue alors que les fluctuations du plan d'eau sont rapides. En plus, l'appréciation du centimètre est insuffisante pour la connaissance du débit déversant sur un seuil épais avec des charges de quelques centimètres. On a pu vérifier que l'erreur sur le débit déversé était :

- de $\pm 5\%$ si la charge sur le déversoir dépassait 20 cm
- de $\pm 10\%$ si la charge sur le déversoir était de 12 cm
- de $\pm 15\%$ si la charge sur le déversoir était de 8 cm
- de $\pm 25\%$ si la charge sur le déversoir était de 4 cm

De la sorte se trouve complètement faussé le bilan hydrique de l'année 1963-64 au cours de laquelle le déversement a duré 127 jours (96 jours avec moins de 8 cm de charge et 50 avec moins de 4 cm).

Le tableau 1 donne le bilan par périodes de 15 jours, en dégageant l'évaporation comme terme résiduel de calcul. Les valeurs sont négatives pour les mois d'écoulement et le calcul d'erreur montre que les chiffres ainsi obtenus sont inférieurs à l'erreur maximale probable sur le calcul, dont le poste prépondérant est le déversement.

En 1964-65, un limnigraphe a été installé dans la retenue et un contrôle de niveau effectué dans le thalweg en aval de la retenue, où les fluctuations du plan d'eau lors des déversements se trouvaient évidemment amplifiées.

Le tableau 2 donne le bilan par périodes de 15 jours également. L'hypothèse sur les débits déversés est presque levée en totalité et l'évaporation calculée est très plausible; elle est correctement liée à celle que l'on observe durant les mêmes périodes sur le bac d'évaporation de classe A; les variations du rapport de ces 2 termes sont raisonnables. L'évaporation sur bac est à réduire pour passer à la grande retenue de 0,66 à 0,82 en saison sèche (valeurs mesurées par quinzaines) et de 0,72 à 0,93 en saison pluvieuse.

On peut dire sans risque de méprise que l'évaporation calculée à partir du bilan hydrique du réservoir est connue avec une erreur maximale certainement inférieure à 50% (pour les périodes de 5 - 10 et 15 jours) et inférieure à $\pm 25\%$ à l'échelle du mois.

EN CONCLUSION

On peut affirmer qu'une retenue est susceptible, en région intertropicale, de fournir une information de qualité et de quantité presque équivalentes à celles que l'on tire d'une bonne station classique de réseau hydrométrique. Pour cela, il faut que certaines conditions soient remplies; elles peuvent l'être généralement sans trop de difficulté ni de frais élevés. Nous donnons une énumération des principales conditions par ordre d'importance.

- a) Existence d'une courbe de cubature soignée donnant volumes et surfaces en fonction des hauteurs d'eau;
- b) Enregistrement continu des variations du plan d'eau de la retenue à l'aide d'un limnigraphe doté d'une échelle de réduction apte à fournir avec précision le centimètre et si possible le demi-centimètre;
- c) Présence d'un déversoir de construction soigné dont l'étalonnage puisse être effectué sur le seuil même ou dans le thalweg juste aval (dans ce 2ème cas, une échelle et même un limnigraphe seraient utilement installés dans cette section de contrôle aval, mais il faut faire attention à la stabilité du lit);
- d) Présence d'au moins un pluviomètre à lecture régulière au droit du barrage;
- e) Contrôle effectif des divers prélèvements pour utilisation;
- f) Présence souhaitable d'un bac évaporatoire à proximité du site.

TABLEAU I

Bilan hydrique de l'açude Aracé en 1963-64

Date	Volume de précipit. en m ³ (1)	Écoulement total Q _C +Q _{AC} m ³ (2)	Entrée açude m ³ (1+2)	Δ V m ³ (3)	Volume déversé m ³ (4)	Irrigation m ³ (5)	Sortie açude m ³ (4+5)	Pertes m ³ (1+2)-(4+5) ±3	Pertes en mm j ⁻¹
15.10 au 30.10.63	0	0	0	- 74 000	0	21 360	21 360	52 640	4,4
31.10 au 24.11.63	6 470	0	6 470	- 90 000	0	29 970	29 970	66 500	3,7
25.11 au 15.12.63	7 010	0	7 010	-110 000	0	21 500	21 500	95 510	6,5
16.12 au 5. 1.64	58 070	0	58 070	- 63 400	0	8 840	8 840	112 630	7,8
6. 1 au 31. 1.64	183 850	0	183 850	+ 96 000	0	0	0	87 850	5,0
1. 2 au 15. 2.64	51 580	6 175	57 756	0	0	0	0	57 756	5,5
16. 2 au 29. 2.64	70 900	29 381	100 281	+ 84 800	0	0	0	15 481	
1. 3 au 15. 3.64	203 520	2 275 096	2 478 616	+908 700	1 675 400	0	2 584 100	-- 105 484	
16. 3 au 31. 3.64	105 950	634 702	740 652	- 25 500	886 000	0	860 500	- 119 848	
1. 4 au 15. 4.64	101 840	1 584 428	1 686 268	+ 59 500	1 519 000	0	1 578 500	+ 107 768	
16. 4 au 30. 4.64	157 930	2 962 892	3 120 822	- 25 500	5 975 260	0	5 950 760	-2 829 940	
1. 5 au 15. 5.64	128 550	1 270 799	1 399 349	+ 25 500	2 067 000	0	2 092 500	- 693 151	
16. 5 au 31. 5.64	68 240	996 435	1 064 675	- 25 500	1 469 500	0	1 444 000	- 379 325	
1. 6 au 15. 6.64	12 020	114 896	126 916	- 42 500	277 500	0	235 000	- 108 084	
16. 6 au 30. 6.64	12 490	40 597	53 087	- 7 500	64 700	0	57 200	- 4 113	
1. 7 au 15. 7.64	36 500	51 950	88 450	0	45 300	0	45 300	+ 43 150	
16. 7 au 31. 7.64	4 500	7 090	11 590	- 17 000	2 130	0	14 870	+ 26 460	
1. 8 au 15. 8.64	15 800	2 510	18 310	- 58 800	0	9 980	48 820	+ 67 130	5,3
16. 8 au 31. 8.64	0	0	0	-117 200	0	19 930	97 270	+ 97 270	7,4
1. 9 au 15. 9.64	1 640	0	1 640	- 89 900	0	21 490	68 410	+ 70 050	5,7
16. 9 au 30. 9.64	0	0	0	- 96 700	0	14 940	81 760	+ 81 760	6,8

TABLEAU 2

Bilan hydrologique de l'açude Aracé — Campagne 64-65

Date	Volume de précipit. en m ³ (1)	Écoulement total $Q_C + Q_{AC}$ m ³ (2)	Entrée açude m ³ (1+2)	ΔV m ³ (3)	Volume déversé m ³ (4)	Irrigation m ³ (5)	Sortie açude m ³ (4+5)	Pertes m ³ (1+2) - (4+5) ± 3	Pertes en mm j ⁻¹
30. 9.64									
15.10.64				- 99 300		13 419	13 419	85 881	7,2
31.10.64	4 752		4 752	- 93 800		22 072	22 072	76 480	6,2
15.11.64				- 87 400		11 836	11 836	75 564	6,6
30.11.64				-108 300		20 917	20 917	87 383	7,8
15.12.64	4 263		4 263	- 69 700		14 068	14 068	59 895	5,4
31.12.64	3 585		3 585	- 93 300		14 179	14 179	82 702	7,2
15. 1.65	15 007		15 007	- 45 200		4 941	4 941	55 266	5,3
31. 1.65	28 070		28 070	- 38 000		0	0	66 070	6,0
15. 2.65	2 992		2 992	- 71 400		0	0	74 392	7,3
28. 2.65	6 901		6 901	- 50 200		0	0	57 101	6,6
15. 3.65	17 450		17 450	- 52 400		0	0	69 850	7,1
31. 3.65	57 683	6 400	64 083	+ 35 750		0	0	28 333	2,7
15. 4.65	64 579	102 300	166 879	+141 700		0	0	25 179	2,5
30. 4.65	79 055	661 520	740 575	+673 550		0	0	67 025	6,4
15. 5.65	67 971	191 670	259 641	+202 500		0	0	57 141	4,7
31. 5.65	10 363	35 620	45 983	- 16 600		0	0	62 583	4,7
15. 6.65	13 673	518 830	529 193	+227 100	263 000	0	263 000	39 090	3,1*
30. 6.65	39 750	539 070	578 820	- 68 000	554 240		554 240	92 580	7,2
15. 7.65	13 451	13 360	26 811	- 16 900	15 570		15 570	28 141	2,2
31. 7.65	0	410	420	- 50 500	0		0	50 920	3,8

* Pour la période du 1 au 11 juin l'évaporation est de 3,4 mm/j.

Une retenue, dont la capacité se situe entre quelques millions et quelques centaines de millions de m³ et qui remplit les conditions précédentes doit pouvoir tenir correctement la fonction de station hydrométrique dans un réseau. Ce point est d'autant moins négligeable qu'en pays en voie de développement, la retenue est un élément de progrès; catalyseur régional, elle voit toujours un noyau actif s'organiser autour d'elle ce qui facilite les problèmes d'équipement, d'observation et d'entretien qui sont toujours les points faibles des stations du réseau en de tels pays.