LE MODÈLE MATHÉMATIQUE DU DELTA DU MÉKONG

Troisième partie *

PAR D. ZANOBETTI **
ET
H. LONGERÉ ***

5. Construction du modèle mathématique du Mékong

5.1. L'image de la réalité.

La nappe d'inondation $Z(x, y, t)$ est approximée par un gaufrage prismatique, dont les faces supérieures figurent la forme de cette nappe.

a) Il faut définir d'abord ce gaufrage et découper le domaine maximal de la nappe en casiers (ou mailles); ce découpage reflète les damiers naturels qui peuvent être soit hydrauliques (fleuves, rivières, canaux), soit routiers : dans le Delta, en effet, les routes sont en digue pour dominer l'inondation.

Quand ce découpage est trop grand ou qu'il représente mal le sens naturel de l'écoulement, il faut augmenter localement la densité du maillage.

Au total 293 mailles (dont une, le Grand Lac) représentent le Delta inondé, c'est-à-dire 35 200 km²

plus les 13 000 km² du Grand Lac; la surface moyenne d'une maille est donc de 120 km², soit un carré de 11 km. La distance moyenne entre mailles, d'environ 11 km, correspond à une dénivelée moyenne entre mailles de :

$$11 \cdot 10^3 \times 3,5 \cdot 10^{-5} = 0,39 \text{ m}$$

($3,5 \cdot 10^{-5}$ représente la pente moyenne du Delta).

Une fois ce découpage effectué, on groupe les différents casiers (préalablement numérotés) par étages, conformément à la théorie numérique précédemment développée. On établit, par la même occasion, le schéma topologique du domaine maillé, qui n'est autre que la structure formelle de l'ensemble des casiers : telle maille a-t-elle un échange avec une autre? Si oui, on le matérialise par une liaison; sinon, on ne trace aucune jonction. Par suite, autour d'une maille symbolisée par un rond numéroté, il y a autant de mailles adjacentes (ou d'échanges de débit) qu'il y a de lignes isogènes de ce rond.

Le modèle mathématique comprend 664 liaisons, soit un peu plus de quatre liaisons par maille, puisqu'elles fonctionnent dans les deux sens et sont reprises deux fois dans le calcul. Sur ces 664 liaisons, 150 sont du type fluvial; 494 sont du type à déversoir.

b) Nous avons vu dans la théorie numérique précédente que la cote Z_i du casier i était prise égale à celle d'un point intérieur à la maille, appelé « centre ». Il faut donc définir ce centre : si le découpage des mailles était très petit, la position du centre à l'intérieur de la maille serait indifférente,

* Les deux premières parties de cet article ont été publiées dans les numéros 1/1968 (pages 17 à 30) et 4 (pages 255 à 269).

** Professeur à l'Université de Bologne, ancien directeur de la Division des études, de la recherche et de l'enseignement technique de l'Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture (UNESCO) et directeur du projet du modèle mathématique du Delta du Mékong;

*** Chef adjoint du Service hydroélectrique à la Société Grenobleise d'Études et d'Applications Hydrauliques (SOGREAH) de Grenoble et ingénieur en chef du projet du modèle mathématique du Delta du Mékong.

comme il l'est, par exemple, dans la théorie de l'intégrale.

Mais ici, les mailles n'ont pas de dimensions aussi élémentaires (11 km de côté!).

Il est apparu que, dans 90 % des mailles, une position géométriquement centrale de ce « centre » s'accommodait du sens général de l'écoulement au cours de la crue. Par contre, dans 10 % des mailles, il n'en a pas été ainsi et il a fallu déplacer le « centre » de sa position géométriquement centrale ou diviser les mailles en parties plus petites.

c) C'est en ces centres, que le modèle mathématique calculera l'évolution des niveaux, sur eux que se fera le réglage du modèle mathématique, c'est-à-dire qu'en ces points devront être reproduits, par le réglage du modèle, les évolutions des niveaux naturels $Z(t)$.

Par suite, le réglage du modèle mathématique se fera sur 293 points de contrôle.

5.2. Les données du modèle mathématique.

Comme tout problème aux dérivées partielles, le système indéfini des équations générales ne suffit pas à la détermination du problème. Il faut (a), des conditions limites, (b), des conditions initiales.

a) Les « conditions limites » correspondent :
— aux conditions aux parois; topographie et hydrographie des axes hydrauliques;
— aux conditions limites sur le pourtour du domaine.

Elles sont ici de plusieurs types :

Type 1 ou 2 : $Z(t)$, c'est-à-dire le limnigramme niveau/temps : tel est le limnigramme du Mékong à l'entrée amont du modèle (Kratie).

Un cas particulier est $Z = 0$ (niveau moyen de la mer).

Type 3 : $Q(t)$ (hydrogramme débit/temps); un cas particulier est $Q = 0$ (terres insubmersibles définissant la limite ultime de la zone d'inondation).

Type 4 : $Q(Z)$ courbe de jaugeage connue;
— aux conditions extérieures à l'écoulement, comme les éléments météorologiques : pluie et évaporation.

b) Les conditions initiales demandent la connaissance de l'écoulement à l'intérieur du domaine, et sur son pourtour, à l'instant origine.

5.3. Les données du réglage du modèle mathématique.

Le réglage, tel qu'il a été défini précédemment, demande :

- la connaissance préalable des courbes $Z(t)$ nature aux centres de maille. Ces courbes $Z(t)$ sont déterminées d'après les observations faites aux stations, soit directement si une échelle coïncide avec un centre, soit indirectement par interpolation à partir des échelles les plus voisines du centre. Cette interpolation est plus précise le long des axes hydrauliques qu'en plaine, où la direction du vecteur d'interpolation est moins bien déterminée que dans l'axe unidimensionnel d'une rivière;
- la connaissance des éléments hydrauliques de départ :
— coefficient de Strickler (liaison fluviale de type 1);

— coefficients de débit (liaison singulière de type 2).

Ces coefficients donnent les débits d'échange entre mailles : chaque liaison traduit un échange, qu'il soit de type fluvial (1) ou singulier (2).

La connaissance du débit d'échange, correspondant à diverses époques, permet de calculer le (ou les) coefficient K de Strickler (ou la débitance), ou les coefficients de débits : il suffit d'écrire que, compte tenu des hauteurs correspondantes aux centres des mailles considérées, le débit a bien la valeur voulue.

Ce calcul préalable demande donc la connaissance de tous les débits d'échange entre les mailles : cette connaissance est soit directe (mesures de débits), soit le plus souvent indirecte (par estimations qui portent sur une grande zone); cette connaissance indirecte demande donc un sens aigu de l'hydraulique du système et ne fait plus appel à la seule technique de la programmation ou de l'analyse numérique.

De la sorte, on bâtit un réseau « approché », que le réglage conduira progressivement à la réalité : plus le réseau est approché, plus rapide sera le réglage.

Cette partie, préalable au réglage, conduite par l'hydraulicien, est donc fondamentale et personnalise l'hydraulique d'un modèle qui est apparu jusqu'ici anonyme.

5.4. Les éléments de départ d'un essai.

Pour faire un essai de réglage, il faut les données du modèle et celles de la crue.

5.4.1. DONNÉES DU MODÈLE :

— Les conditions aux parois, c'est-à-dire la topographie des lieux : cette topographie est exprimée sous forme de tables numériques, selon une grille d'entrée en Z (compte tenu de la variation actuelle de niveaux, cette grille a 56 valeurs échelonnées depuis — 3 m jusqu'à 24 m).

Il faut calculer :

- les 293 valeurs de la surface S_i au plan d'eau, une pour chacune des 293 mailles, soit :

$$293 \times 56 = 16\,408 \text{ valeurs numériques}$$

- les deux éléments (R, A) nécessaires à celui des débitances fluviales calculées selon Strickler :

$$KRA^{2/3}$$

Pour les 150 liaisons fluviales, il faut donc :

$$2 \times 56 \times 150 = 16\,800 \text{ valeurs}$$

- Les coefficients hydrauliques nécessaires à l'écoulement :

α	coefficient de pondération pour les liaisons fluviales.	150
Δx	distance séparant deux centres de liaisons fluviales.	150
K	coefficient de Strickler des liaisons fluviales *.	173

* Certaines liaisons fluviales ont plus d'un Strickler.

(Z_s, φ) coefficients de débits définis par un ou plusieurs couples.	1 093
Soit, au total.	1 566
valeurs.	

5.4.2. DONNÉES DE LA CRUE :

— Conditions extérieures : il y a 45 conditions au pourtour, dont :

30 du type 1 ou 2 $Z(t)$,
15 du type 3 $Q(t)$.

Ces données sont fournies pour tous les jours de la crue.

Pour les 4 mois 1/2 de la crue, soit 153 valeurs quotidiennes, nous aurons :

$$153 \times 45 = 6\,885 \text{ valeurs numériques}$$

— Conditions initiales : 338 valeurs (correspondant aux 293 mailles et aux 45 limites).

— Courbes $Z(t)$ au centre de chaque maille : on se contente d'une valeur par semaine, vu la régularité de la crue :

$$26 \times 293 = 7\,618 \text{ valeurs}$$

— Conditions météorologiques : il y a 18 postes de base et les valeurs sont fournies quotidiennement tout le long des 4 mois et demi :

$$2 \times 18 \times 153 = 5\,508 \text{ valeurs}$$

5.5. Conclusions.

Au total :

— la construction du modèle demande le calcul et le report sur ordinateur des conditions :

— aux parois.	16 408 + 16 800 = 33 208
— hydrauliques $(\alpha, \Delta x, K, Z_s, \varphi)$	1 566
	34 774

valeurs numériques.

— le passage d'une crue demande :

— conditions au pourtour.	6 885
— conditions initiales.	338
— courbes $Z(t)$ de référence.	7 618
— conditions météorologiques.	5 508
	20 349

Le modèle demande le calcul préalable de 34 774 valeurs numériques et leur mise en forme pour la machine, c'est-à-dire près de 200 000 chiffres.

Chaque crue demande en outre 20 349 valeurs numériques, soit à peu près l'utilisation de 100 000 chiffres.

Un essai de réglage demande donc la disponibilité de 300 000 chiffres, qu'il faut calculer, écrire, mettre en bordereau, perforer et stocker en ordinateur.

— le réglage du modèle mathématique du Mékong requiert la détermination progressive de :

$$173 \text{ Strickler} + 2 \times 1\,093 (Z_s, \varphi),$$

c'est-à-dire 2 359 valeurs, soit à peu près 8 par maille.

On voit l'ampleur du réglage du modèle.

6. Réglage du modèle mathématique du Mékong

Ce réglage a été exécuté en deux étapes :

- réglage du modèle préliminaire;
- réglage du modèle définitif.

6.1. Caractéristiques du réglage du modèle mathématique.

Comme on l'a vu plus haut, le réglage consiste d'abord à reproduire aux centres de maille les courbes $Z(t)$ de référence; l'identité sur 293 points pendant cinq mois assure de l'unicité pratique de la solution en Z . Autrement dit, notre approximation numérique n'est pas un hasard, un cas d'espèce, associé à un ensemble $Z(t)$. Il en est quasi indépendant et approxime la réalité naturelle convenablement, quelle que soit la crue dans un même domaine de niveaux. Quoiqu'il faille retrouver en outre les débits mesurés dans la réalité, le réglage sur les hauteurs est le plus délicat; car, une fois les hauteurs réglées et compte tenu de l'unicité pratique de la solution en Z , les bons débits s'obtiennent en général toujours rapidement : il est presque toujours possible d'injecter, à partir d'un drain majeur ou d'une condition en débit indépendante de l'écoulement, le débit supplémentaire convenable et en suivre l'évacuation jusqu'au bout.

Le réglage se fait en modifiant les paramètres hydrauliques :

— coefficient de Strickler (ou débitances).

On peut en changer pour chaque pas de la grille des niveaux, si on le désire;

— couples (Z_s, φ) des coefficients de débits :

Ces paramètres servent à représenter la loi de débit $Q(Z_{\text{amont}}, Z_{\text{aval}})$ qui passe entre deux mailles : on approxime cette loi par une suite plus ou moins longue de couples (Z_s, φ) .

D'ailleurs, deux couples (Z_s, φ) correspondent à la donnée de quatre paramètres et il est rare qu'une fonction naturelle ne puisse être approximée par quatre paramètres.

Le rôle du « réseau approché » et celui de l'hydraulicien qui l'établit, sont fondamentaux, car la rapidité du réglage, donc son efficacité pratique, en dépendent.

Les corrections apportées à une maille aboutissent généralement à des effets moindres qu'escomptés : il y a dilution des effets dans les mailles adjacentes à la maille corrigée. Un effet certain demande d'étendre assez loin la cascade des corrections; dans ce cas, le temps passé aux calculs préalables de correction doit être comparé avec la rapidité de l'essai : en moyenne, un essai de réglage demandait 3 jours de travail et correspondait à une liste d'une cinquantaine de corrections $(Z_s, \varphi; K)$.

Au bout d'un certain nombre d'essais, toute modification nouvelle améliore un endroit mais l'aggrave ailleurs. On arrive, en quelque sorte, à la limite de la représentation numérique de l'écoulement, compte tenu des éléments d'observation dont on dispose. Une précision plus grande demanderait d'accroître la densité du maillage et *corrélativement* celle des observations : car, sinon, le nouveau

schéma ne serait qu'une interpolation pure et simple, et n'apporterait qu'une mince amélioration.

L'évolution du réglage des mailles les classe en trois catégories :

- celles dont le réglage est rapide; elles correspondent aux axes hydrauliques unidimensionnels où l'écoulement est régulier, c'est-à-dire environ 25 % des mailles;
- celles qui demandent une durée de réglage normale (6 à 7 essais), environ 60 % des mailles;
- celles qui, réticentes au réglage (15 %), conditionnent sa durée asymptotique : leur représentation imparfaite dans le modèle peut provenir de plusieurs causes :

- la courbe $Z(t)$ de référence est elle-même imprécise : on est en plaine, les interpolations à partir des échelles sont aléatoires, particulièrement en début et en fin de crue, où chaque maille garde ou retrouve son individualité;

- la topographie est peu précise, ou plus exactement des ouvrages locaux temporaires (par exemple barrages en terre édifiés par les habitants, barrages de poissons) déforment l'écoulement au début ou en fin de crue : lorsque la crue est, en effet, générale, l'écoulement est régulier dans le Delta et dans ce cas le réglage est partout correct;

- les mailles sont isolées et situées à la limite de l'inondation : leur évolution est tributaire de la pluie locale.

6.2. Déroulement du réglage.

Le modèle préliminaire a été réglé sur des données recueillies dans les archives des Services publics; le modèle définitif l'a été sur les données des campagnes de mesures 1963 et 1964.

6.2.1. RÉGLAGE DU MODÈLE PRÉLIMINAIRE.

L'examen des archives a montré :

- qu'il n'existait aucune crue dans le passé dont on ait suivi l'évolution dans la totalité du Delta;
- que la topographie du terrain n'avait pas partout la même valeur ni la même densité;
- que l'écoulement n'avait pas la même structure dans les diverses parties du Delta;
- que la référence du nivellement n'était pas la même dans le Delta.

En conséquence, le Delta a été décomposé en 6 régions dont chacune correspondait à un ensemble homogène, selon les critères ci-dessus :

- Quadrilatère de l'Ouest,
- Plaine des Jones,
- Cis Bassac Vietnamien,
- Rive gauche du Mékong,
- Trans Bassac Cambodgien,
- Grand Lac.

Nous avons commencé par la mieux connue (Quadrilatère de l'Ouest), afin d'attribuer, le cas échéant, l'imperfection du réglage à un défaut de méthode.

Les quatre premières régions ont été réglées.

L'avant dernière n'a pas pu l'être, car elle donnait une vidange générale trop lente. Comme celle-ci se fait, en grande partie, par la rivière de Chau-

doc, dont on ignorait alors la débitance, cette vidange trop lente pouvait s'expliquer par sa débitance trop faible. C'est ce qu'ont montré les campagnes de mesures ultérieures; aussi avons-nous repris ce réglage dans le modèle définitif, avec une débitance beaucoup plus grande de la rivière de Chaudoc et, retrouvé, cette fois, l'allure générale de la vidange.

La dernière région n'a pas été réglée car, à cette date, nous n'avions pas encore déterminé la capacité du Grand Lac.

6.2.2. RÉGLAGE DU MODÈLE DÉFINITIF.

On a composé un seul modèle en juxtaposant les six morceaux précédents et on a fait passer la première crue « moderne » de réglage : 1963; les crues modernes sont connues pendant 4 mois, alors que les crues précédentes ne l'étaient qu'au plus pendant un mois et demi, au voisinage du maximum.

Dès le premier essai, 50 % des 293 $Z(t)$ calculés représentaient les niveaux nature à moins de 20 cm; l'intérêt du réglage préliminaire, même limité à 4 morceaux sur 6, est donc manifeste.

Lors de l'essai n° 8, 89 % des casiers étaient réglés à moins de 20 cm, 48 % des casiers étaient réglés à moins de 10 cm.

A partir de l'essai n° 9, nous avons utilisé la deuxième crue « moderne » de réglage : 1964. Sur cette crue 1964, d'emblée 71 % des casiers étaient réglés à moins de 20 cm, et 33 % des casiers étaient réglés sur 4 mois à moins de 10 cm.

Le réglage définitif 1963 a donné un meilleur résultat sur la crue « moderne » 1964 que le réglage préliminaire n'avait donné sur la crue 1963.

Préliminaire → 1963	59 % < 20 cm
Réglage 1963 → 1964	71 % < 20 cm

Enfin, l'unicité de l'approximation numérique est assurée. Car, d'une part, les crues 1963 et 1964 évoluent dans la même gamme de niveaux (0, ... 9 m à Phnom Penh); d'autre part, la crue 1963 a été précoce et très progressive, la crue 1964 très brutale et tardive. La forme de la crue n'affectait pas l'unicité de la représentation numérique par le modèle.

On a poursuivi le réglage, et en finale, nous avons abouti à un modèle dont les caractéristiques sont les suivantes pour 4 mois de crue :

CRUE PRÉCISION	PROPORTION DU NOMBRE DE CASIERS RÉGLÉS	
	1963	1964
à 10 cm	60 %	53 %
à 20 cm	84 %	89 %

Enfin, au cours du réglage définitif, nous avons été amenés à constater des anomalies dans les observations, dont le modèle a pu donner le sens et l'ordre de grandeur (comme un modèle physique). Chaque fois, ils ont été confirmés par l'expérience. En général, la cause était le nivellement de ces échelles.

J/

Découpage du Delta en six parties. Modèle préliminaire.

Six-part division of the Delta. Preliminary model.

Corrélativement, les débits ont été correctement reproduits, comme il résulte des deux tableaux suivants.

MÉKONG Usine des eaux à Phnom Penh			
DATE	MESURES (m ³ /s)	MODÈLE MATHÉMATIQUE (m ³ /s)	ECART MESURE- MODÈLE (m ³ /s)
25-10-63	15 344	14 700	+ 644
28-10-63	13 208	13 365	— 157
22-11-63	11 904	13 075	— 1 171
6-08-64	15 100	15 990	— 890
12-08-64	25 370	25 383	— 13
19-08-64	25 728	28 658	— 2 930
26-08-64	30 110	29 639	+ 471
4-09-64	31 448	32 536	— 1 088
23-09-64	31 740	35 724	— 3 984
25-09-64	33 784	39 005	— 5 221
9-10-64	34 640	35 549	— 909
30-10-64	19 386	19 151	+ 235
4-11-64	15 164	16 640	— 1 476
Total absolu.	302 926	319 415	19 189
Total algébrique.			— 16 489
Ecart relatif absolu.			6,2 %
Ecart relatif algébrique.			5,3 %

BASSAC Au pont Monivong (Phnom Penh)			
DATE	MESURES (m ³ /s)	MODÈLE MATHÉMATIQUE (m ³ /s)	ECART MESURE- MODÈLE (m ³ /s)
31-08-63	4 840	4 914	— 74
29-10-63	3 396	3 316	+ 80
23-11-63	3 490	2 855	— 365
5-08-64	1 500	1 912	— 412
13-08-64	2 180	2 676	— 496
19-08-64	3 008	3 486	— 478
28-08-64	4 260	4 086	+ 174
1-09-64	4 258	4 276	— 18
4-09-64	4 274	4 222	+ 52
24-09-64	5 350	5 427	— 77
25-09-64	5 764	5 718	+ 46
8-10-64	6 784	6 505	+ 279
4-11-64	3 992	3 794	+ 198
Total absolu.	52 096	53 187	2 749
Total algébrique.			— 1 091
Ecart relatif absolu.			5,2 %
Ecart relatif algébrique.			2,1 %

Pour l'ensemble du Delta, la précision moyenne absolue de reproduction des débits par le modèle est de 6,8 % : si on se rapporte à la précision moyenne de la mesure d'un débit (5 %), à juste titre, on peut estimer la représentation du modèle conforme aux données expérimentales de la nature.

6.2.3. PASSAGE DES CRUES 1961 ET 1962.

Bien que ces crues aient été loin d'être observées avec autant de détails (dix fois moins que les crues de 1963 et 1964), nous avons néanmoins fait passer ces crues sur le modèle.

Crue 1962 :

Sur les seuls sept points de contrôle (Kompong Cham, Phnom Penh, Tanchau, Mytho sur le Mékong; Chauphu, LongXuyen, Cantho sur le Bassac), les écarts moyens sur 4 mois de crue sont de 0,08 m. Ceci n'est pas très étonnant, car 1962 n'est que légèrement plus forte que 1963 et 1964.

K/ Fidélité du réglage pour diverses formes de l'évolution du plan d'eau.

Model adjustment accuracy for various patterns of water level variations.

Maximum à Phnom Penh Port :

1962	9,17 m
1963	8,78 m
1964	9,02 m

Crue 1961 :

Aux mêmes points, les écarts moyens sur cinq mois de crue sont de 0,21 m.

La reproduction est moins parfaite, car la crue de 1961 était une crue très forte (9,98 m à Phnom Penh) et le maximum est à près d'un mètre au-dessus de ceux de 1962, ... 1964, qui se groupent dans 39 cm.

Par suite, comme le réglage n'a été fait que sur un domaine de niveaux moyens (1963, 1964), il ne peut représenter les niveaux élevés avec la même précision que celle obtenue en 1963 et 1964.

6.2.4. DÉCRUE 1963-1964.

Le réglage a été fait pour des niveaux *moyens de crue*. Pour étudier le fonctionnement du barrage en décrue, il fallait : effectuer le réglage pour les niveaux inférieurs en basses eaux.

Les décrues ont en général la même forme et on s'est borné à une décrue unique de base : celle de l'étiage très bien connu de 1963-1964.

En conclusion de ce réglage, 37 % des mailles sont réglées à moins de 10 cm; 93 % des mailles sont réglées à moins de 20 cm.

Le réglage fin (moins de 10 cm) de décrue a un pourcentage inférieur à celui de la crue, car, aux basses eaux, l'individualité de chaque maille du Delta apparaît nettement et l'interpolation de la courbe $Z(t)$ de référence, à partir des échelles, est généralement plus aléatoire.

Pour les débits (Mékong à l'aval de Phnom Penh) on aboutit à la même approximation de 6 %.

6.3. Conclusions.

Nous avons un modèle mathématique qui couvre une gamme de niveaux allant de l'étiage jusqu'au maximum de 1964 (soit, à Phnom Penh Port, de 0,71 à 9,02 m).

Tout emploi du modèle hors de ces limites est une extrapolation, dont la valeur est indiquée par le passage de la crue 1961 sur le modèle.

7. Exploitation du modèle mathématique du Mékong

7.1. Le problème de la régularisation.

Une fois le modèle réglé, il fallait l'exploiter, c'est-à-dire :

- introduire le barrage;
- voir l'influence de ce barrage sur certaines crues.

Rappelons le rôle de ce barrage : jusqu'en juin, le Tonlé Sap coule du Grand Lac vers le Mékong qu'il rejoint à Phnom Penh; la crue amont du Mékong arrive, il y a inversion du courant dans le Tonlé Sap qui coule dès lors vers le nord, c'est-à-dire vers le Grand Lac. Cette crue le remplit progressivement

jusqu'au maximum de la crue : c'est la phase du remplissage du Grand Lac, à laquelle contribue d'ailleurs son propre bassin versant (44 000 km²); ensuite, c'est la décrue du Mékong, la vidange du Lac et l'inversion corrélative du sens du Tonlé Sap qui coule vers le Mékong, jusqu'à l'arrivée, en juin suivant, de la nouvelle crue.

On a donc une régularisation naturelle par le Grand Lac du régime du Mékong, en crue et en décrue : cette régularisation est cependant d'une ampleur moindre en crue qu'en décrue, car une partie importante du volume du Lac (72.10⁹ m³ à la cote exceptionnelle NGK * : 11 m) est remplie par le bassin versant du Lac (25 % environ, en moyenne).

Pour si importante que cette régularisation paraisse en valeur absolue, elle devient impuissante dans le cas de crues trop rapides ou trop fortes, compte tenu des délais de transmission de la crue par la rivière Tonlé Sap (145 km depuis Phnom Penh); d'un autre côté, la vidange naturelle se fait dès le tout début de la décrue, à une époque d'eaux hautes ou moyennes du Mékong où cette vidange n'est pas nécessaire : c'est autant de perdu pour l'étiage de saison sèche; si, de son côté, la crue a été faible ou si la décrue est trop rapide, cela peut amener, en fin de saison sèche, un manque d'eau dans le Delta, qui peut se conjuguer avec un retard de la saison humide suivante.

C'est pour pallier ces inconvénients et augmenter le rendement de cette régularisation qu'a été conçue l'idée d'un barrage sur le Tonlé Sap : au début de la crue, les eaux sont inoffensives et on ferme le barrage : ainsi, le Grand Lac n'est pas inutilement encombré par les premières eaux de la crue.

Lorsque la crue atteint une valeur critique à définir, on ouvre le barrage, de manière à étêter la pointe de crue naturelle, grâce au volume jusque là réservé dans le Lac.

Inversement, dès que le maximum est atteint dans le Grand Lac, on ferme le barrage et on distribue la vidange principalement pendant la saison sèche, c'est-à-dire de janvier à mai.

Quelle est la grandeur de l'étêtement de la crue et quelles en seront les conséquences?

Quelle sera la majoration garantie sur le régime d'étiage et quelles en seront les conséquences?

.....

C'est à ces questions que devait répondre l'exploitation du modèle mathématique.

7.2. Introduction du barrage dans le modèle.

La conception du barrage est l'œuvre de l'Indian Power and Water Commission (New Delhi) chargée de l'ingénierie du barrage et du rapport économique sur cet ouvrage.

L'ouverture brute du barrage a 560 m de largeur (28 vannes de 20 m); celui-ci est prolongé latéralement par des digues en terre qui le raccordent au terrain naturel sur chaque rive : la dénivellée maximale de part et d'autre du barrage est de 11 m, le débit maximal nominal, de 15 000 m³/s.

* NGK : Nivellement Général Khmer.

Comme il fonctionnera dans les deux sens, suivant le sens de l'écoulement dans le Tonlé Sap, la section type de ce barrage est quasi symétrique par rapport à l'axe des seuils du barrage; il comprend une écluse, pour permettre le passage de la navigation fluviale entre le Grand Lac (ou Kompong Thom, via le Stung Sen) et Phnom Penh.

Le barrage est situé au droit de la ville de Kompong Chhnang; si la rive occidentale du Tonlé Sap depuis Oudong jusqu'à Kompong Chhnang est montagneuse, il n'en est pas de même de la rive orientale, où le terrain plat est inondé en crue; ce n'est qu'à hauteur de Kompong Chhnang qu'apparaît sur cette rive un massif montagneux isolé.

Deux points sont à définir :

- la perte de charge créée par le barrage;
- le fonctionnement de ce barrage.

7.2.1. PERTE DE CHARGE.

La perte de charge du barrage est variable suivant le degré d'ouverture des vannes du barrage : elle est la plus faible pour un débit donné lorsque toutes les vannes sont ouvertes. C'est donc cette perte de charge minimale qui a été prise en considération pour le barrage.

Les essais effectués en canal vitré par la Mission Indienne avaient pour but d'examiner les conditions de restitution aval; à la perte de charge calculée par ces essais, il a fallu adjoindre celle due aux conditions d'approche du barrage.

En effet, comme la largeur du barrage est nettement plus courte que celle du lit naturel (8 000 m en hautes eaux), l'ouvrage constitue un diaphragme pour l'écoulement, même dirigé vers le barrage par des ouvrages d'approche (guide bunds).

L'estimation de cette perte de charge a été faite par la SOGREAH, à partir des résultats Indiens, à l'aide de recherches bibliographiques et d'essais.

On a donc un graphique donnant la loi F (perte de charge) = $f(Z_{\text{amont}}, Q)$ barrage tout ouvert.

L'introduction de ce graphique sous forme de tables numériques dans le modèle, caractérise le barrage *en crue* :

$$Q = f(Z_{\text{amont}}, Z_{\text{aval}})$$

Un autre type de loi du barrage a été ajouté : $Q = Q(t)$, débit imposé suivant le temps, ou, ce qui revient au même, $Q = Q_0$, Q_0 étant une succession chronologique de débits. Ce type de loi a été utilisé principalement *en vidange*.

7.2.2. FONCTIONNEMENT DU BARRAGE.

La multiplicité, la variété des crues naturelles, et le nombre infini de paramètres du barrage (28 vannes, ouvertures variables) font qu'il faut choisir un fonctionnement dans le triple ensemble de manœuvres.

Les critères du choix sont les suivants :

- ne pas aggraver les écoulements naturels (en particulier les vitesses dans le Tonlé Sap);
- tenir compte des différentes limitations exprimées à ce jour par les différentes disciplines de l'étude (botanique, ichtyologie, sédimentologie, hydraulique du barrage);
- prévoir une manœuvre simple.

a) Manœuvre en crue :

- en début de crue, à une date T_0 , on ferme le barrage;
- en cours de crue, à une date T_1 , on ouvre le barrage;
- en fin de crue, à une date T_F , on ferme le barrage.

Si la date T_1 est très proche de T_0 , l'effet du barrage est nul; si la date T_1 est très éloignée de T_0 , jusqu'à devenir postérieure à la date du maximum T_F à Phnom Penh, cela revient à couper le Grand Lac de la crue : en conséquence, l'effet du barrage sera le plus défavorable.

Entre ces deux extrêmes, l'écrêtement A_M optimal est attendu pour une date T_{1M} intermédiaire entre T_0 et T_F :

L'évolution espérée du maximum Z_M de la hauteur d'eau en un point donné en fonction de la date T_1 doit avoir en conséquence la forme ci-contre (courbe Γ).

Le modèle doit donc confirmer l'existence pratique de A_M et de T_{1M} (car, compte tenu des temps de propagation, de l'inertie du Tonlé Sap, on pourrait craindre que l'effet A existe, mais qu'il soit négligeable).

b) Manœuvre en décrue :

Le choix de la manœuvre est différent : il s'agit d'obtenir le plus longtemps possible dans le Mékong aval, un débit constant grâce à une vidange du Lac contrôlée par le barrage : c'est le type de régularisation adopté ici.

Cette régularisation, au sens propre du terme, aura donc un intérêt d'autant plus grand que le débit constant sera plus élevé ou qu'il durera plus longtemps.

Elle dépend en particulier de la réserve du Lac, accumulée lors de la crue antérieure.

Si la régularisation est ici toujours possible *a priori*, quelle en sera la valeur du débit constant? La répercussion sur les niveaux aval? Quel sera le rôle de l'évaporation?

7.3. Résultats de l'exploitation du modèle.

7.3.1. FONCTIONNEMENT EN CRUE.

Trois crues ont servi à éprouver l'influence du barrage :

- les deux crues naturelles de réglage :
1963, progressive et hypomédiane,
1964, brutale et médiane;
- la crue 1961, très puissante et précoce; quoique, en toute rigueur pour utiliser cette dernière, le réglage eût dû pouvoir être effectué pour les hauts niveaux, nous avons cependant noté la

réponse du modèle vis-à-vis d'une crue de cette ampleur (cinquième par ordre de grandeur décroissante).

On a fixé la date T_0 de fermeture initiale au 15 juillet : cette date correspond à l'assurance que certains facteurs, comme la remontée des eaux rouges du Mékong jusqu'au Grand Lac, auront eu lieu avant cette date T_0 , car ces eaux rouges suivent en général la première crue élémentaire du Mékong, annonciatrice de la crue générale, et elles accompagnent les migrations de poissons vers le Grand Lac.

Du point de vue général, il ne faut donc pas envisager un fonctionnement qui perturberait la vie biologique du Grand Lac, une des réserves les plus poissonneuses du monde.

Les résultats sont donnés par le tracé des courbes (Γ) et par les hydrogrammes de crue sans et avec barrage.

L'abaissement A existe, quelle qu'ait été la crue étudiée (1961, 1963 et 1964).

Il existe, pour chacune des trois crues, une valeur $T_1 = T_{1M}$ pour laquelle l'abaissement A est maximal A_M .

Les valeurs A, A_M et T_{1M} , dépendent :

- de la crue,
- du lieu,
- de la date T_0 , fermeture du barrage,
- de la date T_1 , ouverture du barrage,
- du niveau du Lac pendant la fermeture du barrage.

a) *Avec la crue étudiée :*

- en grandeur; exemple Phnom Penh :

	CRUE	T_{1M}	A_M (m)
$T_0 = 15$ juillet	1961	26 août	0,26
	1963	10 août	0,20
	1964	20 septembre	0,32

A des crues précoces (1961, 1963) correspondent des dates précoces T_{1M} (26 août; 10 août); à la crue tardive (1964) correspond une date T_{1M} tardive (20 septembre);

- en définition : si la crue n'a qu'une pointe unique, la valeur de A_M est donnée par le minimum absolu de (Γ).

Or, les crues 1961, 1963, 1964 ont deux pointes P_1 , P_2 dont la seconde, P_2 , donne le maximum annuel; à chaque pointe P correspond une courbe Γ . Suivant la grandeur relative des deux pointes P_1 , P_2 à l'entrée du Delta, c'est-à-dire, finalement, l'allure de la crue elle-même et l'époque T_1 , la première pointe P_1 peut être beaucoup plus aggravée par le fonctionnement (T_1) du barrage que n'est minorée la deuxième pointe P_2 par ce même fonctionnement.

Il y a donc un compromis à trouver; l'abaissement optimal A_M n'est pas plus le minimum de la courbe $\Gamma_1(P_1)$ que celui de la courbe $\Gamma_2(P_2)$. Il est obtenu ici à l'intersection des deux courbes (Γ_1 , Γ_2) : le minimum absolu A_M fait place à un minimum rela-

tif et l'abaissement n'est pas aussi important qu'avec une pointe unique (P_1 ou P_2).

b) *Avec le lieu.*

L'abaissement A (et A_M) est le plus important dans les principales artères fluviales, dont la réponse hydraulique est rapide (Mékong; Bassac); il décroît latéralement, au fur et à mesure qu'on s'en éloigne vers les terres marginales; enfin, il s'annule nécessairement au niveau de base, c'est-à-dire la mer; par contre, le temps T_{1M} varie peu.

L'influence du barrage n'intéresse pratiquement que la région deltaïque et ne remonte guère au-delà de l'entrée du Mékong dans le Delta, à Kompong Cham (0,23 m de majoration M du niveau maximal en cas de fermeture permanente du barrage : $T_1 > T_F$).

c) *Avec le niveau N_0 du Lac.*

Niveau que le lac avait à l'époque T_0 d'ouverture du barrage : plus cette cote N_0 (T_0) sera basse, meilleur sera l'écrêtement A, toutes choses égales par ailleurs.

Les essais effectués ont permis de juger de l'effet A'_M du barrage lorsque le Lac, à la date T_0 (15/7) est, par exemple, à la cote + 4,85 NGK (N_0 : 1964). A cette cote de 4,85 NGK correspond une date T'_0 , pour les crues 1961 et 1963 différente de $T_0 = 15/7$

$$T'_0(1961) = 25/6$$

$$T'_0(1963) = 1/8$$

CRUE	NIVEAU $N_0(T_0)$ NATUREL DU LAC (NGK)	A_M (m)	NIVEAU $N_0(T'_0)$ DE RÉFÉRENCE (NGK)	T'_0	A'_M (m)
1961	6,20	0,26	4,85	25,6	0,46
1963	4,35	0,20	4,85	1,8	0,18
1964	4,85	0,32	4,85	15,7	0,32

Le haut niveau N_0 (T_0) en 1961 est la cause du faible écrêtement observé pour cette crue très puissante.

Pour associer le plus faible niveau N_0 à la fermeture du barrage, on a donc intérêt à fermer le barrage le plus tôt possible, juste après la migration des poissons vers le Lac. De la sorte, un remplissage du Lac par le Mékong sera minimisé, et le Lac ne se remplira guère qu'avec son seul bassin versant.

d) *Avec la date T_0 de fermeture initiale.*

Ceci s'explique très bien qualitativement à la suite du paragraphe précédent; toutefois, quantitativement, une avance de la date T_0 donnera un gain appréciable dans le seul cas des crues précoces; au contraire, dans le cas de crues tardives (1964) une avance de la date T_0 n'apportera aucune bonification sensible à l'écrêtement, car le volume en jeu en début de crue est faible.

Si on retarde la date d'ouverture T_0 , on observe une réduction rapide de l'écrêtement A_M .

Si l'abaissement A_M varie avec T_0 , la date T_{1M} (A_M) reste pratiquement inchangée.

L/

M/

L, M, N/

Hydrogrammes naturels et hydrogrammes modulés par le barrage (Grand Lac, Phnom Penh et Tanchau).
Natural hydrographs and hydrographs showing effect of dam (Grand Lac, Phnom Penh and Tanchau).

O, P, Q/

Valeur de l'écrêtement de la pointe de crue en différents points du Delta.
Degree of flood damping at various points in the Delta.

N/

O/ Amont / Upstream.

P/ Milieu / Middle part.

CRUES PRÉCOCES	$T_0 = 1/7$	$T_0 = 15/7$	$T_0 = 1/8$
ÉCRÈTEMENT	A_M (m)	A_M (m)	A_M (m)
1961	0,41	0,26	0,12
1963	0,24	0,20	0,16

e) Avec la date T_1 d'ouverture.

Comme le montre le tracé des courbes Γ : dépasser l'époque T_M du maximum naturel, revient à supprimer la régularisation naturelle du Lac. L'asymptote horizontale M (puisque pour tout $T_1 > T_F$, le niveau $M = Z_M$ est inchangé) des niveaux Z_M donne donc la valeur de cette régularisation :

Lieu : Phnom Penh	
CRUE	EXHAUSSEMENT M MAXIMAL (m)
1961	0,79
1963	0,94
1964	0,98

Le Lac diminue donc de près d'un mètre les hauteurs maximales à Phnom Penh.

b) Importance de l'abaissement de la pointe de crue.

L'abaissement maximal A_M représente, en moyenne, à Phnom Penh, dans les meilleures conditions possibles, les 35 % de la régularisation natu-

relle des niveaux apportée par le Lac : ainsi donc, une simple modulation du remplissage de ce Lac suffit à majorer de 35 % l'effet régulateur du Lac à Phnom Penh, ce qui est considérable pour un effet second.

On peut imaginer, à partir de la manœuvre proposée (T_0, T_1), d'autres manœuvres plus fines et plus adaptées aux cas d'espèces; mais le gain obtenu aux dépens de la simplicité sera du second ordre par rapport à celui de la manœuvre vis-à-vis de la régularisation naturelle.

g) Prévision de la date T_{1M} .

Il est aisé de trouver la date T_{1M} optimale quand on connaît *a priori* la crue; supposons pour le moment cette date prévisible. Une erreur de quelques jours sur T_{1M} est-elle admissible sur cette prévision?

Les courbes Γ (T_1) évoluent lentement vers le minimum, au fur et à mesure que T_1 s'éloigne de T_0 , pour se rapprocher de T_{1M} ; au contraire, dès que T_1 dépasse T_{1M} , les courbes Γ ont une remontée très rapide, vers l'asymptote M des niveaux Z_M .

Si donc on fait une légère erreur ΔT_1 en avance ($\Delta T_1 < 0$) sur la date T_{1M} , on diminue légèrement l'écrêtement; si on fait, par contre, la même erreur ΔT_1 sur la date T_{1M} mais en retard ($\Delta T_1 > 0$), l'écrêtement diminue très vite et même on peut aboutir à l'effet inverse de l'écrêtement, c'est-à-dire à l'aggravation des niveaux.

En conséquence, il vaut mieux prévoir par défaut ($\Delta T_1 < 0$) que par excès ($\Delta T_1 > 0$).

Cette date T_{1M} est très variable : 26 août (1961), 10 août (1963), 20 septembre (1964).

Peut-on la relier à un phénomène physique dont on peut suivre et même prévoir le déroulement : niveau, débit ou combinaison des deux?

L'étude de ces trois crues très différentes a permis de dégager les critères provisoires suivants :

a) Si on sait que la crue aura deux pointes P_1, P_2 et que la date d'apparition de la première à l'entrée du Delta, c'est-à-dire à Kompong Cham, est T_{P1} :

$$T_{1M} = T_{P1} - 3 \text{ jours}$$

Cette égalité globale correspond à une position de sécurité par défaut ($\Delta T_1 \leq 0$) ($\Delta T_1 = -2$ jours pour 1964, $\Delta T_1 = 0$ jour pour 1963, $\Delta T_1 = -17$ jours pour 1964).

Le rendement moyen du fonctionnement a donc diminué : l'écrêtement moyen A n'est plus que les 75 % de l'écrêtement moyen optimal A_M .

b) Le barrage est supposé fermé depuis l'instant T_0 ; dès qu'à Phnom Penh, la cote atteint une valeur $y_c = 8,80$ m NGK, il faut ouvrir le barrage : cette valeur critique y_c a été choisie par défaut (ΔT_1 1961 = -4 j, ΔT_1 1963 = 0, ΔT_1 1964 = +1 j) toujours dans le sens de la sécurité ($\Delta T_{1M} \leq 0$).

Le rendement moyen du fonctionnement du barrage est meilleur que précédemment; l'écrêtement A est les 90 % de l'écrêtement moyen optimal A_M .

Il est intéressant de faire correspondre le niveau naturel atteint (c'est-à-dire sans barrage) :

$$y'_c = 8,05 \text{ NGK}$$

Q/ Aval / Downstream.

Si on sait la cote à Phnom Penh de la crue *naturelle* ne jamais atteindre 8,05 m, il est inutile de fermer au départ le barrage, car, à partir de ce critère y'_c , on n'ouvrirait plus le barrage. On transformerait au contraire une crue basse en une crue moyenne et surtout on n'aurait plus constitué de réserve pour la saison sèche future (le volume du Lac n'est en effet rempli qu'au quart par son propre bassin versant).

c) Dès qu'à Kratié l'« impulsion » du Mékong $P(T)$ atteint une valeur critique P_c de 200 000 m⁴/s, il faut ouvrir le barrage.

Cette correspondance est prise dans le sens de la sécurité et le rendement *moyen* de l'écrêtement est de 97 %. Ce critère est également indépendant du barrage : le remous du barrage en crue n'atteint jamais Kratié. C'est donc le meilleur critère; mais il est aussi le plus compliqué.

On définit empiriquement « l'impulsion » $P(T)$ comme le produit du volume W écoulé depuis le 29 juin à Kratié (d'après les valeurs quotidiennes des débits de l'*Annuaire Hydrologique du Comité du Mékong*) par le gradient moyen du niveau à Kratié : $\Delta h/\Delta t$, Δh étant la variation de niveau entre la date T et le 29 juin, Δt l'intervalle de temps écoulé entre T et le 29 juin.

Cette définition empirique entend tenir compte de deux paramètres de la crue : sa puissance (W) et sa rapidité ($\Delta h/\Delta t$), dont l'un peut compenser l'autre du point de vue effet final.

d) La *prévision des crues* aidera le fonctionnement de ce barrage.

Elle prévoira lequel des trois événements est le plus précoce : $T_{P1} - 3$ jours (si la crue est bicéphale), y'_c 8,05 m naturel (ou 8,80 m modulé), ou $P_c = 200\,000$ m⁴/s.

On choisira comme date T_1 , *tout au moins en début d'exploitation*, la date d'apparition la plus précoce des trois événements :

$$\left| \begin{array}{l} T_{P1} = 3 \text{ jours} \\ y_c \text{ (ou } y'_c) \\ P_c \end{array} \right.$$

Si on attend un maximum naturel annuel inférieur à 8,05 m NGK, il n'y a aucun avantage à faire fonctionner le barrage : il faut le laisser constamment *ouvert* en crue. Entre les valeurs de la crue 1963 (8,86 NGK Phnom Penh, Usine des eaux) et cette cote de 8,05 m, l'écrêtement A_M diminue vraisemblablement assez vite en valeur absolue.

Conclusions tirées du modèle sur la régularisation de la crue.

— Augmentation sensible de la régularisation naturelle de l'ensemble des niveaux : 35 % de l'amélioration à Phnom Penh, sur l'écrêtement des crues. Si en absolu, l'écrêtement paraît faible (0,55 m au maximum), il faut le rapporter à la dispersion naturelle des niveaux maximaux à Phnom Penh qui est de 2,80 m (la crue 1894 est de valeur douteuse). Cet écrêtement diminue de 18 % la dispersion totale des niveaux maximaux;

— Diminution de l'étendue de l'inondation qui permettra une récupération des terres marginales en limite de l'inondation;

— Diminution du volume de l'inondation, dont l'évacuation est particulièrement laborieuse dans le Delta Vietnamien;

— Possibilité du maintien d'une réserve dans le Lac pour la saison sèche suivante en fermant le barrage juste après le maximum : T_M .

Mais il se produit alors une descente des niveaux plus rapide que d'ordinaire, sans excéder toutefois les vitesses constatées en montée.

Par contre, du point de vue agricole, cette accélération de la descente des niveaux peut contrarier la récolte rizicole (riz flottant) : il est conseillé, pour le moment, de maintenir pendant 3 semaines la vidange *naturelle*, afin de maintenir les conditions actuelles de l'agriculture; on laissera donc le barrage ouvert à $T_M + 3$ semaines.

Enfin, dès le mois de novembre, il faudra ouvrir le barrage afin de permettre la migration des poissons vers le Mékong. Ces deux impératifs diminueront d'autant la réserve théoriquement possible.

— Aggravation de la première pointe du crue P_1 .

Du point de vue agricole également, l'ouverture à la date T_{1M} exacerbe la première pointe de crue P_1 dont l'influence naturelle dans le Delta était amortie : aussi l'aggravation de cette pointe, à une époque précoce du calendrier cultural, est préjudiciable : par suite conviendrait-il d'avancer cette date T_{1M} , ce qui est favorable à la sécurité, mais défavorable à l'écrêtement.

Il y a donc plusieurs compromis à trouver.

— Diminution de la réserve du Lac, consécutive à l'écrêtement du maximum (moyenne : 8.10^9 m³ soit 11 % de la capacité totale du Lac). Cette perte est en partie compensée par l'apport du bassin versant du Lac qui ruisselle encore en octobre et novembre, c'est-à-dire après la date du maximum T_M de la crue à Phnom Penh.

Compte tenu des délais de transmission dus au Tonlé Sap, et au fonctionnement du barrage, l'abaissement L_M du Lac est au plus égal à l'écrêtement A_M à Phnom Penh. Il en reste cependant assez voisin quand la crue est précoce (1961 : $L_M = 0,55$ m contre $A_M = 0,26$ m; 1963 : $L_M = 0,20$ m contre $A_M = 0,20$ m); par contre, si la crue (donc la date T_{1M}) est tardive, le remplissage du Lac se fait mal et l'abaissement L_M est beaucoup plus important que A_M (1964 : $L_M = 1,23$ m contre $A_M = 0,32$ m). Ceci s'explique très bien pour 1964, car la date T_{1M} (20 septembre) est alors très voisine de celle T_M du maximum : T_M (1964) = 7 octobre et dans un si court délai, compte tenu de l'inertie du Tonlé Sap, la crue n'a pas le temps de remplir le Lac, que déjà la décrue du Mékong s'amorce à Phnom Penh.

Si on sait donc la crue tardive, il faut ouvrir assez tôt pour disposer d'une réserve suffisante dans le Lac.

7.3.2. FONCTIONNEMENT EN DÉCRUE.

La régularisation adoptée pour la décrue consiste à utiliser la réserve du Lac, maintenue au nord du barrage, de manière à obtenir un débit constant Q_{PP0} à l'aval de Phnom Penh (Bassac + Mékong aval).

Le barrage évidemment sera ouvert lorsque le débit à l'aval de Phnom Penh sera inférieur à la quantité Q_{PP_0} fixée. Auparavant, cela ne serait d'aucun intérêt, puisqu'on dispose d'un excédent d'eau par rapport à Q_{PP_0} .

D'autre part, compte tenu des remarques énoncées au cours de l'étude du fonctionnement en crue, c'est-à-dire :

- agriculture : conserver, pour le moment, la décrue naturelle pendant 3 semaines, donc laisser le barrage ouvert, après la date du maximum à Phnom Penh, pendant 3 semaines,
- ichtyologie : ouvrir le barrage, pendant quelques jours dès le mois de novembre, pour permettre la libre migration aval des poissons vers le Mékong;

la date origine de l'exploitation du barrage en décrue a été fixée au 1^{er} décembre.

Le problème est donc de trouver ce débit constant d'étiage Q_{PP_0} et de le relier à la réserve du Lac, constituée au cours de la crue antérieure, compte tenu des pertes par évaporation dans le Lac et de la perte de charge du barrage.

CONCLUSIONS TIRÉES DU MODÈLE SUR LA RÉGULARISATION DE LA DÉCRUE.

— *Cette régularisation est toujours possible.*

La crue la plus basse connue (1955) sur les 72 observées a atteint 7,31 NGK à Phnom Penh Port; on peut admettre pour l'instant que ce maximum correspond à celui du Grand Lac (il peut en différer en vérité d'environ 0,20 m suivant les crues).

Du maximum au 1^{er} décembre, le Grand Lac perdra environ 14 milliards de mètres cubes (par évaporation, nécessités agricoles et ichtyologiques) et au 1^{er} décembre, il aura atteint un niveau de 5,50 NGK. A ce niveau correspond une réserve qui permet l'établissement d'un étiage de 3 300/3 400 m³/s (Mékong aval + Bassac).

Or l'étiage moyen naturel est de 2 000 m³/s. Le gain est donc manifeste, même dans ce cas extrême.

— *La régularisation dépend évidemment de la réserve du Lac.*

C'est-à-dire du niveau atteint par le Lac au 1^{er} décembre : pour un niveau maximal de 10,62 m (crue de 1894 supposée écrêtée par le barrage) le débit Q_{PP_0} est de 6 800 m³/s.

— *Domaine de régularisation.*

Ainsi donc, la régularisation de la vidange conduit à substituer à l'étiage naturel de 2 000 m³/s à l'aval de Phnom Penh, un domaine artificiel de basses eaux compris entre 3 000/3 400 m³/s et 6 800 m³/s.

Le seul Mékong aval verra, quant à lui, son domaine de basses eaux se situer entre 2 900 m³/s et 5 900 m³/s.

L'amélioration en décrue est donc très importante en valeur absolue.

— *Durée de la régularisation.*

La durée de cette régularisation des débits est un autre facteur intéressant de l'exploitation.

NIVEAU DU LAC le 1 ^{er} décembre (m NGK)	Q_{PP_0} (m ³ /s)	DURÉE DU DÉBIT Q_{PP_0} (jours)
9,78	6 150	134
8,31	5 150	127
6,98	4 150	121
5,30	3 150	96

Si le niveau du Lac est égal à 5,30 NGK, le 1^{er} décembre, le débit constant de 3 150 m³/s peut être assuré pendant 96 jours, c'est-à-dire *plus de 3 mois* (du 25 janvier au 1^{er} mai de la décrue type). C'est un gain considérable *en temps*, pendant la saison sèche *précisément*.

Si le niveau du Lac est supérieur à 5,30 NGK, on peut obtenir un débit constant plus élevé associé à une durée plus longue : au maximum 6 800 m³/s, la durée de la régularisation, correspondant à un niveau de 10,62 m, durerait 140 jours, soit près de *cinq mois*.

— *Régularisation des niveaux.*

Cette régularisation des débits aboutit à une régularisation des niveaux : ils se retrouvent partout, plus ou moins, relevés.

A Phnom Penh, le niveau monte d'environ 0,40 m par 1 000 m³/s d'accroissement du débit d'étiage.

A l'amont du Delta, le remous dû au barrage se fait sentir jusqu'à Kratié : 0,40 m lorsque la régularisation est très forte ($Q_{PP_0} = 6 150$ m³/s).

Comme en crue, les fleuves subissent les plus grandes variations de niveau, qui décroissent avec l'éloignement du fleuve.

Conséquences de la régularisation.

— Si l'exhaussement des *niveaux* permettra la navigation, toutefois le changement apporté aux régimes liquide et solide modifiera les fonds qu'on a supposés invariables dans l'étude. Il faut donc être prudent sur la valeur de l'amélioration apportée aux *tirants* d'eau.

— La régularisation du régime, en niveau, facilitera la mise en valeur du Delta (calage des aménagements ultérieurs).

— Le débit d'eau douce disponible permettra en saison sèche l'extension de l'irrigation et le recul du front salin dans le Delta vietnamien.

Toutefois, ces deux objectifs sont complémentaires : l'eau prélevée pour l'irrigation ne peut plus servir à la lutte contre la salinité. Il y a un compromis à trouver.

L'interprétation des observations effectuées en 1963, 1964 et 1965 et auparavant dans le Delta vietnamien, et la recherche d'une relation globale avec le débit d'eau douce Q_{PP_0} , disponible permettent de supposer qu'au mieux ($Q_{PP_0} = 6 800$ m³/s *totale-ment destiné à la lutte contre la salinité*) le front salin critique, dont le développement est d'environ 400 km, reculera de 10 km en moyenne, vers la mer.

— Le niveau moyen naturel du Lac en avril, mai est compris entre 0,85 et 2,10 m : c'est la saison de la pêche. Or le barrage va substituer une gamme de niveaux compris entre 2 et 6 m.

L'augmentation des tirants d'eau dans le Lac, en saison sèche, consécutive à la vidange progressive, entraînera une adaptation nouvelle des pratiques halieutiques, qui correspondaient à des profondeurs beaucoup plus faibles.

8. Bibliographie, coût et personnel du projet

8.1. Bibliographie.

8.1.1. La bibliographie générale du projet est constituée d'abord par les très vastes archives disponibles au Cambodge et au Vietnam; une des tâches de notre travail en a été — comme on l'a déjà mentionné — le recueil et l'étude (il est impossible d'en donner ici une liste exhaustive); et ensuite par les nombreux documents (de synthèse) qui jalonnent l'histoire du bassin inférieur du Mékong. Nous citerons, par ordre chronologique :

- NATIONS UNIES, ECAFE. — Flood damage and Flood control activities in Asia and the Far East. *Flood control series*, n° 1 (octobre 1950) pp. 58-60.
- Id. — Rapport préliminaire sur les problèmes techniques relatifs au contrôle des crues et à la mise en valeur des ressources hydrauliques du Mékong. *Ibid*, n° 8 (mai 1952).
- Id. — Mise en valeur des ressources hydrauliques du bassin inférieur du Mékong. *Ibid*, n° 12 (février 1957).
- Id. — Rapport de la mission d'études Wheeler sur « Programme d'études et d'enquêtes pour l'intégrale mise en valeur du bassin inférieur du Mékong » (janvier 1958).
- BREUVERY (M.E.S. de). — Summary of findings and proposals on the economic development of the Lower Mekong Basin, Nations Unies, Document TAO/AFE/6 (juillet 1959).
- GRUNDY (F.). — Hydrometeorological investigations : Lower Mekong basin. Nations Unies, Document TAO/AFE/8 (juillet 1959).
- JAMME (G.P.). — Contrôle des crues dans le Delta du Mékong et plus spécialement au Vietnam; amélioration du drainage et protection contre l'eau salée, Nations Unies, Document TAO/AFE/7 (juillet 1959).
- SCHWOB (M.). — Mise en valeur des ressources minières dans le bassin inférieur du Mékong. Nations Unies, Document TAO/AFE/9 (juillet 1959).
- VAN RIET (A.L.). — Development of inland navigation in the Lower Mekong Basin. Nations-Unies, Document TAO/AFE/10 (juillet 1959).

8.1.2. La bibliographie spécifique au projet lui-même comprend des *études antérieures au projet* : — soit qu'elles aient préparé le projet lui-même :

- BOURRIÈRES (P.) et PAULSEN (C.G.). — Premier rapport du Comité consultatif au Comité de coordination des études du Bassin inférieur du Mékong, Nations Unies, Document TAO/AFE/5 (janvier 1959).
- JAMME (G.P.), BLIKER ECO (W.) et ARNAUD (P.). — Mission préliminaire (UNESCO) relative au projet de régularisation de la crue du Mékong. ECAFE, Document WRD/MKG/INF/R. 47 (décembre 1960).

— soit que leurs résultats aient été utilisés pendant le projet :

- JAMME (G.P.). — Avant projet d'aménagement de la plaine des Jones (1942).
- MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS DU CAMBODGE. — Les voies navigables du Cambodge (1958).
- MEKONG RECONNAISSANCE TEAM ORGANIZED BY THE GOVERNMENT OF JAPAN. — Comprehensive reconnaissance Report on the major tributaries of the Lower Mekong Basin, Tokio (1961).

Annuaire hydrologiques du bassin inférieur du Mékong, publiés pour les années 1960-1961 par Harza, et pour les années postérieures, par le Comité du Mékong.

Les études contemporaines au projet : Etudes connexes au projet :

- Reports of the Indian Mission on the Tonle Sap Dam, ECAFE, Documents WRD/MKG/INF/L. 96, 97 et 98, (décembre 1962).
- Tonle Sap Barrage Project : Report on designs and cost estimates, deux vol., Central Water & Power Commission New Delhi (1964).
- Rapports sur le fonctionnement d'un barrage sur le Tonlé Sap ECAFE, Documents WRD/MKG/INF/L. 118 par F. d'AUBENTON, chef de la Mission ichthyologique, et L. 119 par M. SCHMID, chef de la Mission botanique (janvier 1964).
- Rapports divers sur la sédimentation dans le Grand Lac ECAFE, Documents WRD/MKG/INF/L. 88 (juin 1962); L. 114 et L. 117, (octobre 1963), par J. P. CARBONNEL.
- Grand Lac du Cambodge, Sédimentologie et hydrologie, un vol. par J. P. CARBONNEL et J. GUISCAFRE (1965).
- Annuaire Hydrologiques du Bassin Inférieur du Mékong (1962-1963-1964-1965), Comité du Mékong.

Les études et les rapports concernant le projet lui-même :

- UNESCO/SOGRÉAH. — Modèle Mathématique du Delta du Mékong : vol. I : Monographie du Delta du Mékong (mai 1966); vol. II : Etudes préliminaires (septembre 1964); vol. III-1 : Campagne de mesures 1963 (décembre 1964); vol. III-2 : Campagne de mesures 1964 (juin 1965); vol. III-3 : Vérification du nivellement dans le Delta Cambodgien (mai 1965); vol. III-4 : Campagne de mesures 1965 (janvier 1966); vol. IV-1 Courbes de remous du Mékong amont (novembre 1965); vol. IV-2 : Réglage du modèle définitif (mars 1966); vol. IV-3 : Exploitation du modèle définitif (mars 1966); vol. IV-4 : Modèle à marée (mai 1966).

ainsi que certains rapports auxiliaires rédigés au cours du projet :

- UNESCO/SOGRÉAH. — Note sur la capacité du Grand Lac (septembre 1964).
- Id. — Note sur les relevés limnimétriques effectués à l'échelle de Phnom-Penh-Port et leurs relations avec les relevés effectués aux Stations de Kompong Cham et de Chauphu (avril 1965).
- Id. — Rapport d'ensemble sur les différentes déterminations de la capacité du Grand Lac (février 1966).
- UNESCO/ANGLADETTE (A.). — Etude des éventuelles répercussions agricoles résultant de l'exploitation du barrage du Tonlé Sap (mai 1966).

8.2. Coût du projet.

Le financement de ce vaste projet correspond à 1 330 000 \$ soit 6 600 000 F.

5 300 000 F ont été fournis par le Fonds Spécial des Nations Unies et 1 300 000 F par les Etats riverains : Cambodge et Vietnam.

Sur ce total de 6 600 000 F, 5 400 000 F ont été consacrés au modèle lui-même, au cours des 48 mois du projet, de la manière suivante :

— la phase (a), reconnaissance, missions préalables et études des documents.	175 000 F
— la phase (b), modèle préliminaire.	300 000 F
— la phase (c), campagnes de mesures, achat d'équipement.	580 000 F
personnel, matériel, entretien.	3 075 000 F
— la phase (d), modèle définitif : réglage et exploitation.	1 270 000 F
	<hr/> 5 400 000 F

8.3. Personnel.

Un travail de cette envergure a nécessité l'intervention technique et financière de plusieurs organisations et la coordination de leurs efforts. Il serait impossible de donner une liste des noms de tous ceux qui ont coopéré au projet; les auteurs présentent par avance leurs excuses pour les inévitables omissions.

On a déjà mentionné que l'initiative du projet revient au Comité de coordination des études du bassin inférieur du Mékong : de cette organisation nous mentionnerons M. le Dr. H. SCHAAF, Directeur du Comité du Mékong, M. KANWAR SAIN, Directeur des services techniques, M. BERTHELOT, Hydrométéorologue en chef et M. P. BOURRIÈRES, Conseiller technique du Bureau Consultatif. L'UNESCO, sur sa proposition d'assurer l'exécution de l'étude, chargea trois experts : G. JAMME, Eco W. BIJKE et P. ARNAUD, d'une mission préliminaire dont les conclusions constituent le rapport WRD/MKG/INF/R. 47 (décembre 1960).

L'aide financière requise par le projet fut demandée au Fonds Spécial des Nations Unies, à la suite d'un rapport technique préparé par M. SCHWOB.

L'exécution du projet fut confiée à la Division des études, recherches et enseignement techniques de l'UNESCO, dirigée à l'époque par un des auteurs du présent article. Celui-ci s'entoura d'un groupe de consultants constitué par les trois experts déjà mentionnés auxquels s'ajoutèrent G. SUPINO de l'Université de Bologne, A. ABRAMOV du laboratoire de calcul électronique de l'Académie des Sciences de

l'U.R.S.S. et, occasionnellement, J.-P. CARBONNEL, du Centre de recherches géodynamiques de la Faculté des Sciences de Paris, F. d'AUBENTON du Muséum national d'Histoire naturelle de Paris, A. ANGLADETTE expert rizicole.

Du côté des Autorités nationales, nous évoquons parmi les personnalités qui ont pu assister le plus longtemps au déroulement de ce projet;

- M. PHLEK CHATT, Président du Comité Cambodgien du Mékong;
- M. TRINH NGOC SANH, Président du Comité Vietnamien du Mékong.

et enfin, par les Autorités locales des Nations Unies :

- M. de SELYS LONGCHAMPS, représentant du TAB à Phnom Penh;
- M. de CLERCK, représentant de l'UNESCO à Saïgon.

Du côté de la Société adjudicatrice du contrat d'étude, la Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques (SOGREAH), nous citerons :

- M. H. LORGERÉ, Ingénieur chargé du projet du modèle mathématique;
- M. BENET, son adjoint;
- M. A. PREISSMANN, Chef du Service de Recherches Scientifiques;
- M. CUNGE, son adjoint;
- M. R. MANDIN, Ingénieur chargé des campagnes de mesure en Extrême-Orient; ses adjoints : MM. SÉLLIÈS et JOSSERAND.

Gravure du XVIII^e siècle

Abstract

A mathematical model of the Mekong delta

by D. Zanobetti * and H. Lorgeré **

The project is described in three articles.

The first article was published in issue No 1/1968 (pp. 17 to 30). It dealt with the following :

- (i) The aim of the project and its organisation (preliminary inspection of the area, preliminary model, field measurements and the final model);
- (ii) The field measurements and main hydrological features of the Delta;

The second article was published in No 4/1968 (pp. 255 to 269). It dealt with the following :

- (iii) Technical reasons for having chosen a mathematical model for the hydraulic model of the Mekong Delta;
- (iv) General digital solution principles.

The third article is in this issue and covers the following main points :

- (v) 'Construction' of the model (listing and classification of necessary data);
- (vi) Adjustment of the model, i.e. identification of flood conditions on the model with real-life conditions at 293 points in the Delta, for two different flood types (1963 and 1964);
- (vii) Operation of the model (i.e. a study of hydraulic effects of the dam on the 1961, 1963 and 1964 floods, which were taken as representative for the investigation) and general conclusions from the investigation, as regards flood attenuation, navigation, farming, dry-season irrigation, salinity control in the part of the Delta in Vietnam.

* Professeur à l'Université de Bologne, ancien directeur de la Division des études, de la recherche et de l'enseignement technique de l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture (UNESCO) et directeur du projet du modèle mathématique du Delta du Mékong;

** Chef adjoint du Service hydroélectrique à la Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques (SOGREAH) de Grenoble et ingénieur en chef du projet du modèle mathématique du Delta du Mékong.