

L'aménagement de Kariba sur le Zambèze

The Kariba development on the Zambezi

PAR J. LABORDE-MILAA

DIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT DE LA SOCIÉTÉ GÉNÉRALE D'EXPLOITATIONS INDUSTRIELLES (SOGEL)

1. La Rhodésie : caractéristiques, ressources et besoins en énergie. Historique : aménagement de Kariba et Kafué. Mission française en 1954.

2. Aménagement de Kariba : le Zambèze, le choix de l'emplacement, nature du site.

Les grandes lignes du projet : la retenue, le barrage (voûte mince dans une vallée relativement large), l'usine souterraine à l'amont du barrage, les prises d'eau et canaux de fuite situés du même côté de l'usine, l'autre côté étant réservé aux installations électriques et à la liaison avec le hall souterrain des transformateurs. Le problème de la stabilité, les cheminées d'équilibre.

Le déroulement des travaux : dispositions prises pour hâter le démarrage et commencer la dérivation de la rivière.

Les difficultés : crue de 1957, crue exceptionnelle de 1958 et dispositions prises à la suite de cette crue.

Les perspectives d'achèvement des travaux.

1. Rhodesia: features, resources and power requirements. Historical survey: the Kariba and Kafué developments. The 1954 French mission.

2. The Kariba development: the Zambezi, locating the dam, the nature of the site.

The principal features of the project: the reservoir, the dam (a thin arch dam in a relatively broad valley), the underground power house upstream of the dam, the intakes and tail race tunnels located on the same side of the power house, the other side being occupied by electrical equipment and connections to the underground transformer room. The problem of stability, the surge chambers. Construction work: arrangements made to start work earlier and to start diverting the river. Difficulties: the 1957 flood, the exceptional flood in 1958 and precautions taken after this flood.

Future outlook concerning the work completion date.

I. — INDICATIONS GÉNÉRALES SUR LE PAYS

La Fédération de Rhodésie et du Nyassaland est située en Afrique Australe; elle est bordée au nord par le Congo Belge et le Tanganyka, au sud par le Bechuanaland et l'Union Sud-Africaine, à l'ouest et à l'est par les colonies portugaises d'Angola et de Mozambique. Le pays n'a pas de débouché sur la mer. Sa superficie est de 1 300 000 km² environ, soit plus de deux fois la France.

Les trois territoires de Rhodésie du Sud, Rhodésie du Nord, Nyassaland ont constitué en 1953

la Fédération actuelle qui évolue vers un statut de Dominion.

La population comporte seulement :

250 000 Européens (dont 50 000 à Salisbury, la capitale fédérale), et

7 000 000 d'Africains.

Du point de vue physique, la Rhodésie se présente comme un plateau relativement élevé, de 1 000 m d'altitude en moyenne, traversé par la large vallée du Zambèze. Bien que situé dans la

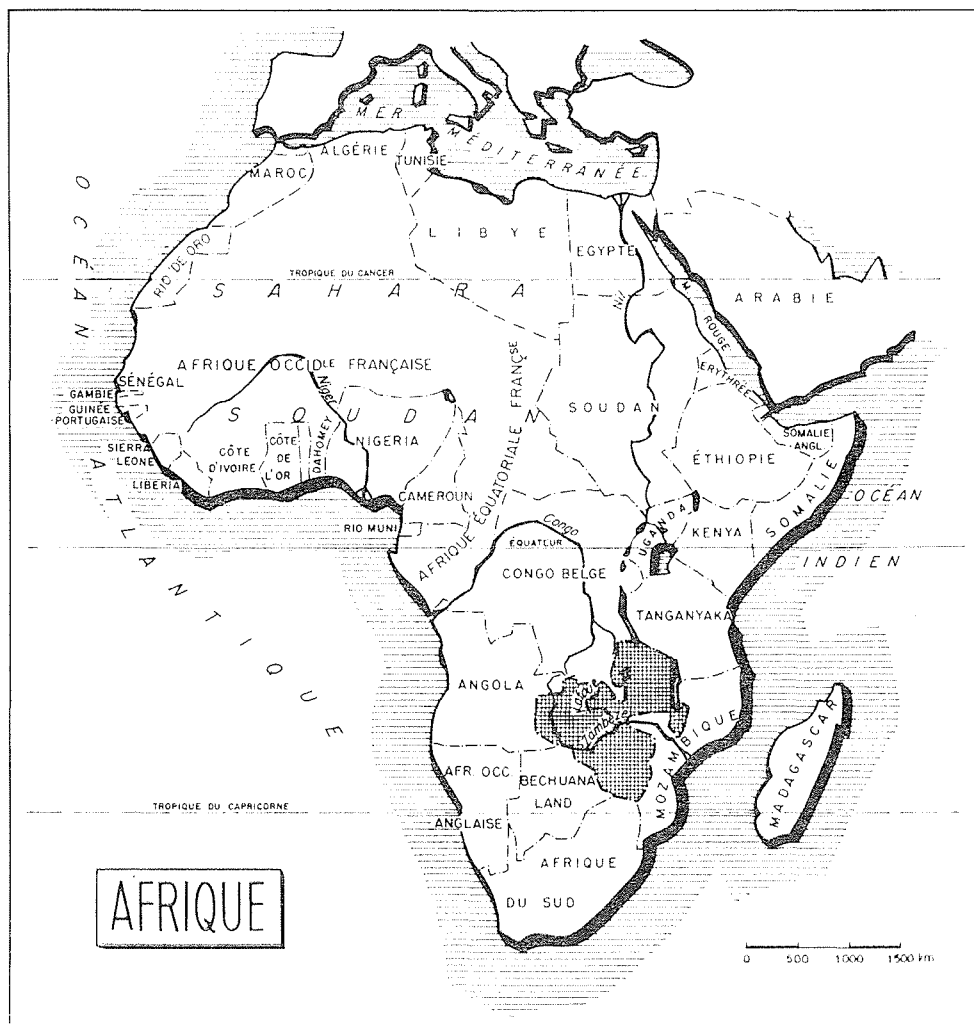


FIG. 1
Carte
d'Afrique.

zone tropicale, le pays jouit en général d'un climat tempéré et sain, grâce à son altitude.

L'agriculture y est très développée (tabac, maïs, thé, coton), ainsi que l'élevage.

Mais ce sont surtout les ressources minérales qui retiennent l'attention, en premier lieu le cuivre produit en Rhodésie du Nord dans les mines du Copperbelt, puis le zinc, le plomb, le chrome, l'amiante, l'or.

Enfin, d'importants gisements de charbon cokéfiable existent à Wankie, en Rhodésie du Sud. La production annuelle dépasse 3 000 000 de t, mais son écoulement est handicapé par les distances et difficultés de transport vers les consommateurs.

L'industrie, surtout développée en Rhodésie du Sud, comporte : une sidérurgie moyenne, des manufactures de tabac, des usines textiles, enfin plusieurs cimenteries, dans les deux Rhodésies, dont la production annuelle dépasse 700 000 t et couvre les besoins du pays,

La production d'énergie électrique est, à l'heure actuelle, presque entièrement assurée par des centrales thermiques placées aux centres de consommation et alimentées par le charbon de Wankie (puissance totale installée 600 MW). Il n'existe aucune interconnexion, sauf entre la Rhodésie du Nord et le Congo Belge, par une ligne 220 kV qui transite environ 50 MW.

En 1956, la consommation d'énergie électrique était de 2 milliards de kWh. Elle a atteint 3 milliards en 1957 et dépassera 8 milliards en 1970, pour satisfaire une demande qui ne cesse d'augmenter dans tous les domaines.

Or, le charbon de Wankie, actuellement brûlé dans les centrales, pourrait avoir une utilisation plus intéressante, étant le seul charbon cokéfiable en Afrique du Centre et du Sud.

Il est donc devenu nécessaire de rechercher des sources d'énergie nouvelles et importantes, d'où l'intérêt des projets de Kafué et Kariba.

II. — CHOIX DU PROJET

Avant la constitution de la Fédération, en 1953, la Rhodésie du Nord et la Rhodésie du Sud avaient chacune leur grand projet d'aménagement hydroélectrique, qui avait fait l'objet d'études antérieures très poussées.

Kafué.

Le projet de la Rhodésie du Nord a prévu un aménagement sur la rivière Kafué, gros affluent rive nord du Zambèze. Cette rivière traverse des gorges où, sur 30 km environ, le niveau descend de 600 m.

Le projet utilise un débit aménagé de 140 m³/s dans deux chutes de 470 m et 130 m en série, avec une productibilité, en année moyenne, de 4 milliards de kWh.

Il existe sur 300 km, à l'amont des gorges, une vaste plaine : les « Kafue flats », où la rivière développe ses méandres et qu'elle inonde à chaque crue. Il ne semble pas que la submersion de ces flats permette de constituer une retenue intéressante, du fait de l'évaporation intense. Par contre, une réserve située à l'amont, à Meshi Teshi, paraît possible, ce qui porterait la production annuelle à 6 milliards de kWh.

Le projet de Kafué présente l'avantage d'une réalisation par étapes, échelonnant l'effort finan-

cier et avec des sites où les accès et les installations de chantiers sont relativement faciles. Malheureusement, les données hydrologiques sont assez minces et la possibilité d'une régularisation amont reste à confirmer.

Kariba.

Le projet de la Rhodésie du Sud a prévu l'aménagement des gorges de Kariba, où le Zambèze traverse, sur 30 km, une barre rocheuse, avec une pente d'ailleurs faible : 5 m sur la longueur totale des gorges.

La construction d'un barrage unique, de 125 m de hauteur environ, permet de créer, en noyant la vaste plaine située à l'amont des gorges, une retenue de l'ordre de 150 milliards de m³, soit plus de trois fois les apports annuels moyens. Deux usines au pied du barrage fournissent, sous une puissance garantie de l'ordre de 2 000 MW, une énergie nouvelle de plus de 7 milliards de kWh.

Le projet de Kariba nécessite de lourds investissements initiaux, car seules les centrales peuvent être construites par étapes. Le coût de la première étape, y compris le réseau de transport, atteint 80 millions de livres sterling — soit un chiffre du même ordre que le budget annuel de la Fédération.

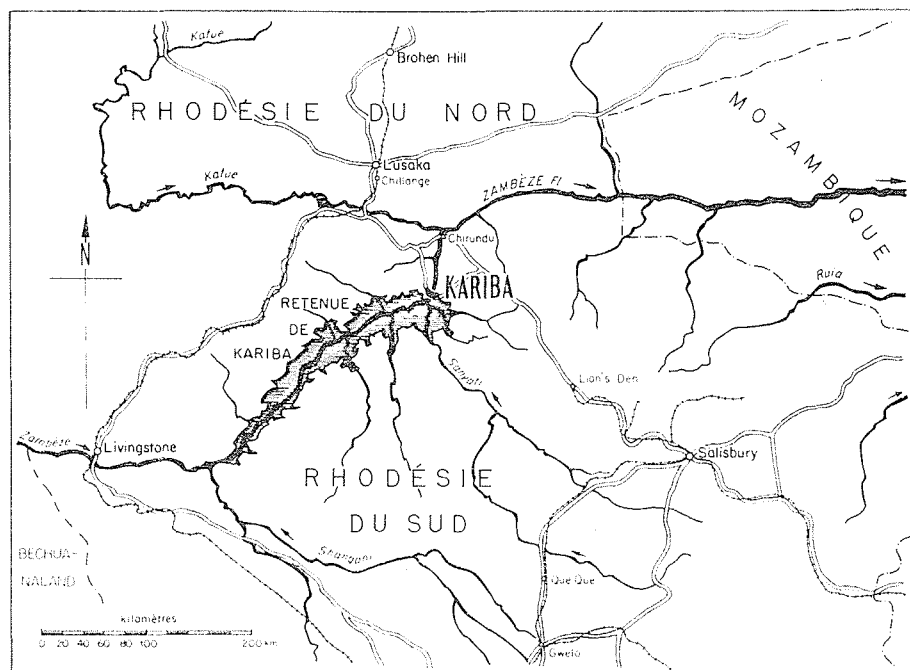


FIG. 2
Carte
de Rhodésie.

Mais l'importance de la retenue permet d'obtenir une régularisation interannuelle presque parfaite. Pour en mesurer la qualité, on peut compter que sur les apports de la rivière, environ 85 % pourront être turbinés, 9 % seront perdus par évaporation et seulement 6 % par déversement.

Si l'on ajoute que les données hydrologiques sont, pour le Zambèze, plus nombreuses et plus précises que pour le Kafué, on comprend que la balance ait penché vers Kariba.

Le Gouvernement Fédéral s'est ainsi trouvé en présence de ces deux projets entre lesquels l'importance des investissements nécessaires lui imposait de faire un choix. Le Premier Ministre, Lord Malvern, décida alors de prendre l'avis de techniciens qualifiés et indépendants. L'E.D.F. fut approchée et recommanda au Gouvernement Fédéral de s'adresser à M. Coyne, à la SOGEL et au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique.

La première mission se rendit sur place en juillet 1954, composée de :

M. Duffaut, inspecteur général des Ponts et Chaussées,

le regretté M. Tisné, alors directeur général de la SOGEL.

M. Renaud, directeur à la SOGEL.

M. Misson, attaché à la direction du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique.

En octobre 1954, la mission remit ses rapports qui, sur la base des études antérieures, et des enseignements de la tournée, confirmaient l'intérêt de Kafué et de Kariba.

Le 1^{er} mars 1955, le premier Ministre prenait

parti officiellement pour Kariba. M. Coyne et M. Tisné se rendirent sur les lieux, en avril 1955, et entérinèrent ce choix.

Dès juin 1954, avait été constitué le Federal Hydro Electric Board, en vue de coordonner la production et la distribution d'énergie. La présidence en fut confiée en 1955 à M. Duncan Anderson, sous l'impulsion duquel Kariba a pu atteindre le développement impressionnant que nous lui connaissons.

Le Board, en mai 1955, désigna les ingénieurs-conseils chargés de l'étude et du contrôle de l'exécution :

— Pour le génie civil : une association constituée de :

Sir Alexander Gibb and Partners, Londres,
Le Bureau André Coyne et J. Bellier,
la SOGEL.

— Pour l'équipement électrique et mécanique :
Merz and Mac Lellan, de Londres et
Newcastle

— Le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, devenu SOGREAH, fut chargé des essais sur modèles réduits.

En même temps, était choisie l'entreprise chargée des travaux préliminaires, qui démarrèrent en juillet 1955.

Enfin les négociations étaient en voie d'aboutissement avec la Banque Internationale et les autres prêteurs pour un financement à long terme.

L'affaire était donc bien engagée. La fin de cette année 1955 devait malheureusement être endeuillée par le décès de M. Tisné, qui avait joué un rôle si éminent dans cette phase décisive.

III. — CONDITIONS GÉNÉRALES DE L'AMÉNAGEMENT DE KARIBA

Le Zambèze.

Le Zambèze a un cours de 2 700 km. Prenant sa source dans le nord-ouest du pays, il traverse l'Angola puis, revenant en Rhodésie, passe à Livingstone, où l'effondrement d'un seuil basaltique a créé les impressionnantes chutes de Victoria.

Le Zambèze serpente ensuite sur 80 km dans une étroite vallée, puis pénètre dans une immense plaine : la Gwembe Valley, peu développée et faiblement peuplée, qui est fermée par les gorges de Kariba, situées à 400 km des chutes de Victoria.

Après Kariba, sur les derniers 1 000 km de son cours, le Zambèze reçoit des affluents de plus en plus importants (dont le Kafué), pénètre en Mozambique où il retrouve à Cahora Bassa

une gorge analogue à Kariba, mais plus étroite, avec un débit double. Un aménagement encore plus important y serait sans doute possible (débit moyen 2 000 m³/s, chute 225 m, productibilité 35 milliards de kWh). Puis la plaine s'élargit et le Zambèze se jette dans l'Océan Indien.

HYDROLOGIE :

Le bassin versant du Zambèze en amont de Kariba est de 513 000 km², environ la superficie de la France.

La pluviométrie — moyenne annuelle 750 mm — (à comparer aux 600 mm moyens de France) est pratiquement concentrée sur une période de cinq mois (novembre à avril), avec une pointe de 240 mm en janvier.

Les données hydrologiques dont on dispose sont les suivantes :

- Lectures d'échelles assurées à Livingstone (chutes de Victoria) depuis 1907 par les chemins de fer, mais incomplètes.
- Lectures aux stations de l'Irrigation Department de Rhodésie du Sud :
 - à Livingstone, depuis 1924,
 - à Chirundu (aval des gorges), depuis 1937, mais interrompues par la guerre,
 - à l'amont des gorges, depuis 1948.

La concordance entre ces diverses mesures est satisfaisante, mais seules les observations faites après la dernière guerre présentent une fréquence et une précision suffisantes pour fournir les débits instantanés.

Le débit d'étiage est de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, le débit moyen $1\,300 \text{ m}^3/\text{s}$, — soit sensiblement celui du Rhône à Donzère —. Les crues normales sont de $3\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ (fréquence observée quatre fois en huit ans) et les crues exceptionnelles $8\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ (fréquence observée une fois en huit ans).

Ces chiffres de crues se sont par la suite révélés insuffisants puisque : en mars 1957, le débit de pointe fut de $8\,400 \text{ m}^3/\text{s}$, et en mars 1958 atteignit $16\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une valeur comparable aux hautes eaux du Saint-Laurent à Montréal.

EMPLACEMENT DU BARRAGE :

Les gorges de Kariba sont relativement larges (200 m à la base) avec des versants en pentes assez douces et fort érodés.

Plusieurs emplacements ont été reconnus et l'Irrigation Department avait, d'après ses observations et les résultats de sondages préliminaires, porté son choix sur un emplacement à l'amont, où le rocher apparaît dans le lit de la rivière. Ce choix fut ratifié par MM. Coyne et Tisné, et les travaux de reconnaissances ultérieurs en confirmèrent l'intérêt.

La vallée y présente un profil de cuvette, la

rive gauche étant abrupte, la rive droite en pente plus douce. Pendant la saison sèche, le fleuve occupe un lit mineur étroit, ce qui permet alors de travailler bas sur les rives.

La roche en place est un gneiss injecté de filons de pegmatites, avec sur le haut de la rive droite une masse de quartzites fortement disloquées. La couche de surface, assez altérée, atteint 30 à 40 m d'épaisseur sur les rives, mais est beaucoup moins importante dans le fond de la vallée.

Il a été décidé d'y placer un barrage en béton déversant de 125 m de hauteur. La solution d'un barrage en enrochements, qui pouvait paraître intéressante à cause de l'économie, fut écartée en raison des difficultés que l'on aurait rencontrées pour l'évacuation des crues pendant et après la construction.

RETENUE :

Une étude économique a permis de déterminer le niveau maximum de retenue, et le débit équipé, en faisant intervenir l'évaporation pour laquelle l'on a admis 1,40 m par an. Le niveau maximum a été fixé à l'altitude de 480 m, correspondant à une capacité du réservoir de 150 milliards de m^3 . La retenue ainsi créée s'étendra à l'amont sur 280 km de longueur, avec une largeur moyenne de 20 km et couvrira une surface de $5\,200 \text{ km}^2$, soit neuf fois le lac de Genève.

Il faudrait, en année moyenne, trois à quatre ans pour la remplir. En effet, l'apport moyen annuel, déduction faite des pertes par évaporation, est de 38 milliards de m^3 , qui peuvent tenir dans la tranche supérieure de 8 m.

Le débit équipé en première étape est de $840 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondant, sous une hauteur de chute nette moyenne de 93 m, à une production annuelle de 3 milliards et demi de kWh — en deuxième étape, la production annuelle dépassant 7 milliards de kWh.

IV. — CARACTÉRISTIQUES DU PROJET

Le *projet initial* de la Mission (octobre 1954) fut établi, après une rapide visite du site. Il s'inspira, dans une large mesure, du projet antérieur établi par Sir William Halcrow.

Il a prévu :

- Un barrage poids-voûte de 122 m de hauteur, avec évacuateur de crues central en saut de ski;
- Deux usines aériennes implantées longitudinalement à l'aval, de chaque côté du fleuve.

À la suite de reconnaissances ultérieures et d'études plus poussées, le projet a été sensible-

ment modifié pour aboutir aux dispositions générales suivantes :

A) En ce qui concerne le barrage :

- La bonne qualité du rocher a permis d'adopter un barrage du type voûte mince, d'où une notable économie de béton;
- L'évacuation des crues par déversement à la partie haute du barrage a pu être simplifiée, puisque les usines sont maintenant souterraines, implantées sous chacun des flancs de la gorge.

B) Il est intéressant de s'arrêter sur les raisons qui ont conduit à choisir ce type d'usine :

1. — En premier lieu, la topographie n'était pas favorable à des usines aériennes :

- a) Difficulté de les loger latéralement en raison de l'importance des déblais rocheux à exécuter sur les flancs de la gorge, et des travaux de confortement;
- b) Dangers d'érosion avec la retombée des évacuateurs de crue entre les usines;
- c) Impossibilité de loger ces usines transversalement au pied du barrage, étant donné leurs dimensions;
- d) Difficulté de réserver l'avenir pour l'équipement de la deuxième usine sans engager des travaux importants.

2. — Par ailleurs, on ne pouvait être sûr de pouvoir construire des usines aériennes sans courir le danger d'un noyage du chantier en cours de travaux. Les crues de 1957 et 1958 en ont fourni *a posteriori* une confirmation éclatante.

3. — Au surplus, il était intéressant de séparer complètement les chantiers du barrage et des usines.

Chaque chantier dispose alors d'une organisation distincte, et sa marche est indépendante des incidents survenant sur l'autre chantier — d'où gain de temps.

4. — Mais c'est finalement le problème de la dérivation de la rivière pendant la construction qui a emporté la décision en faveur d'usines souterraines.

On a pu, en effet, adopter une méthode de construction en rivière, tenant compte :

- D'une part de l'existence du lit mineur en basses eaux, laissant libre une large plage rocheuse sur la rive gauche,
- D'autre part de l'alternance tranchée des saisons sèches et humides.

Nous y reviendrons plus loin, à propos de l'exécution.

V. — NATURE DES OUVRAGES

1. Barrage.

Le barrage est une voûte à double courbure, avec léger surplomb vers l'aval. Les formes en ont été déterminées à la fois par le calcul et par une série d'essais sur modèle en plâtre à l'échelle du 1/400°.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

— Hauteur maxima au-dessus des fondations	125 m
— Longueur en crête.....	615 m
Epaisseur uniforme en crête..	13 m
Epaisseur à la base en clé....	18,5 m
— Altitude du couronnement....	485 m
— Niveau normal de la retenue..	480 m
— Volume total béton.....	1 000 000 m ³
— Volume fouilles, environ....	300 000 m ³

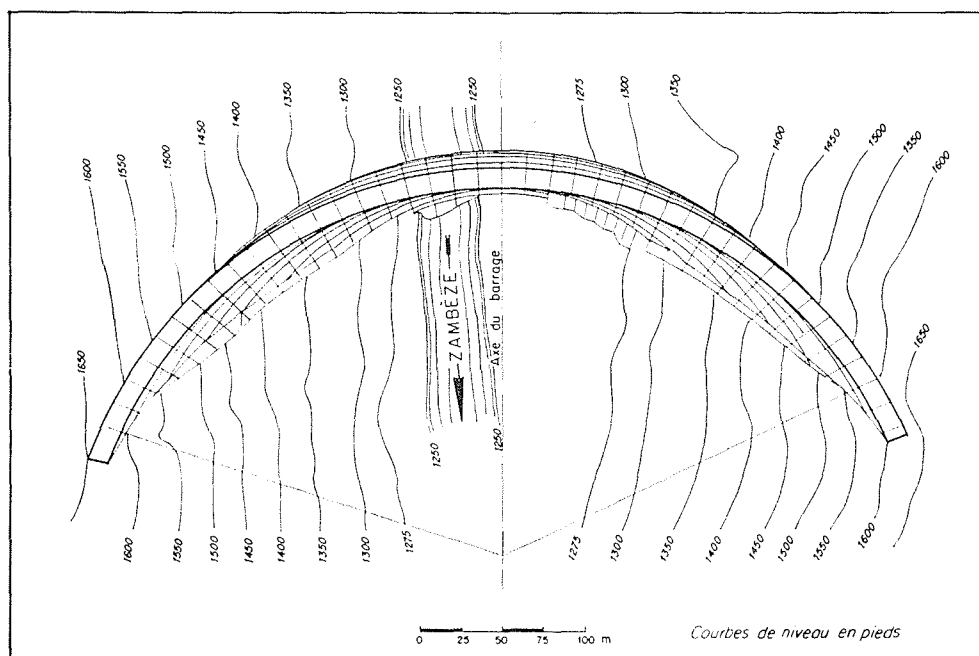


FIG. 3

Vue en plan
du barrage.

Sur la crête passe une route de 12 m de large.

Le déversoir est formé de pertuis percés à travers la voûte, à 30 m sous la cote de retenue normale, afin d'avoir une vitesse initiale de déversement suffisante pour écarter les risques d'érosion au pied du barrage. Le nombre de ces pertuis, fixé initialement à 4, a été porté à 6, à la suite de l'expérience de la crue de 1958. Le débit évacué par les 6 pertuis peut s'élever à 9 500 m³/s sous la cote de retenue exceptionnelle. Chaque pertuis, de 9 m × 9 m, est équipé d'une vanne chenille à l'aval, avec fermeture possible par batardeau à l'amont.

Le barrage ne comporte pas de vannes de fond, car la retenue est trop grande pour qu'on puisse jamais espérer la vidanger.

2. Usine et ouvrages connexes.

a) EQUIPEMENT :

Les progrès récents dans la construction des gros groupes hydroélectriques ont permis d'adopter pour la première usine six groupes de 100 MW (débit unitaire de 140 m³/s sous une chute nette de 93 m), cette puissance unitaire correspondant aux pièces indivisibles les plus lourdes et les plus encombrantes qu'il est possible de transporter par route.

Pour la deuxième usine, l'équipement est encore à l'étude.

Chaque ensemble de deux groupes est relié à trois transformateurs monophasés. La tension du réseau de transport a été fixée, conformément aux normes britanniques, à 330 kV.

b) USINE :

L'usine de première étape, disposée sous la rive droite parallèlement au Zambèze, a été implantée à l'amont du barrage et sous la retenue, afin de réduire au minimum la longueur des conduites d'amenée d'eau aux turbines et permettre ainsi leur alimentation directe sans cheminée d'équilibre amont, ni vannes de garde, sous la seule protection des vannes de prise d'eau.

L'usine de deuxième étape sera installée sous la rive gauche. On prévoit actuellement un simple dispositif de batardeaux devant les futures prises d'eau, ce qui permet de réserver les caractéristiques de cette deuxième usine.

c) PRISES D'EAU :

Une étude comparative a fait préférer la solution des ouvrages de prise disposés sur la pente, avec galeries horizontales, vannes et puits verticaux, à la solution de tours, construites dans la retenue et contenant les ouvrages et les vannes.

Pour permettre la mise en marche de l'usine pendant la période de remplissage du réservoir, les prises d'eau ont été disposées à des niveaux

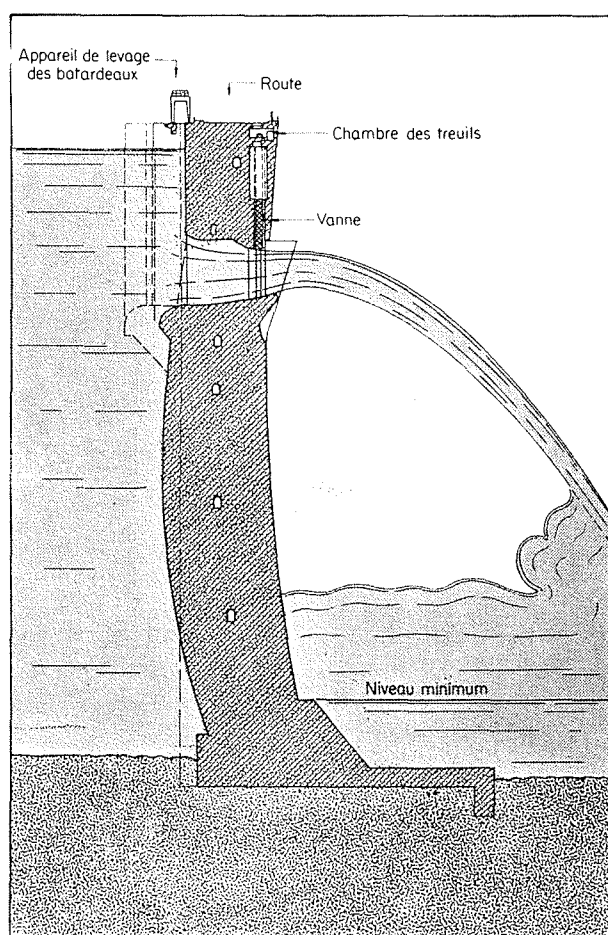


FIG. 4
Coupe du barrage.

différents. Les deux prises du niveau inférieur, alimentant les deux premiers groupes, ne doivent avoir qu'un fonctionnement provisoire (six mois à un an), et leur appareillage sera ultérieurement transféré au niveau supérieur.

d) CANAUX DE FUITE :

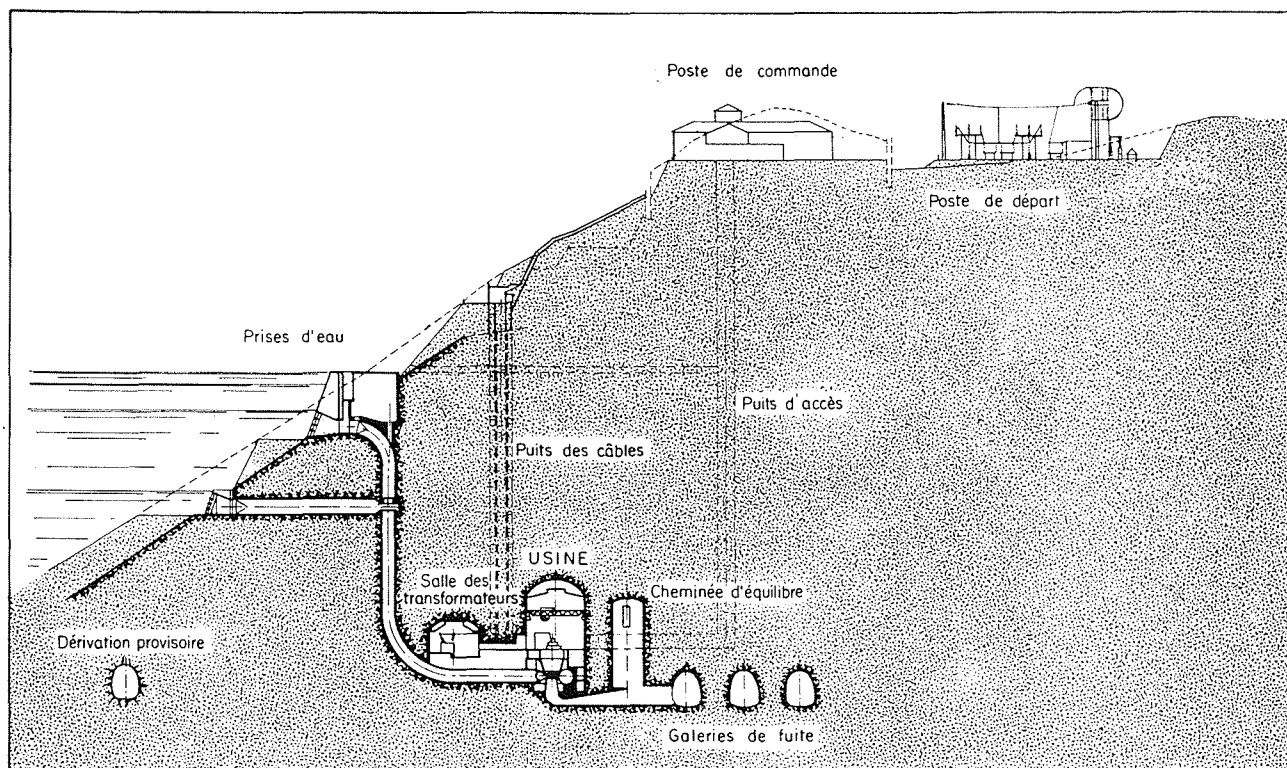
La restitution au Zambèze se fait par des canaux souterrains, de 90 m² de section, débouchant à l'aval du barrage. Ces tunnels fonctionnent en charge, étant donné la grande variation du niveau aval (22 m) entre la marche à l'étiage et la marche de toutes les machines en période de crues exceptionnelles.

e) TRANSFORMATEURS :

Les transformateurs ont été installés en souterrain dans une galerie parallèle à l'usine, l'étude ayant montré les avantages économiques d'une liaison par câbles 330 kV passant en puits entre l'usine et le poste extérieur.

f) POSTE EXTÉRIEUR :

Ce poste est installé sur le sommet d'un mamelon bordant la gorge. A côté du poste est ins-

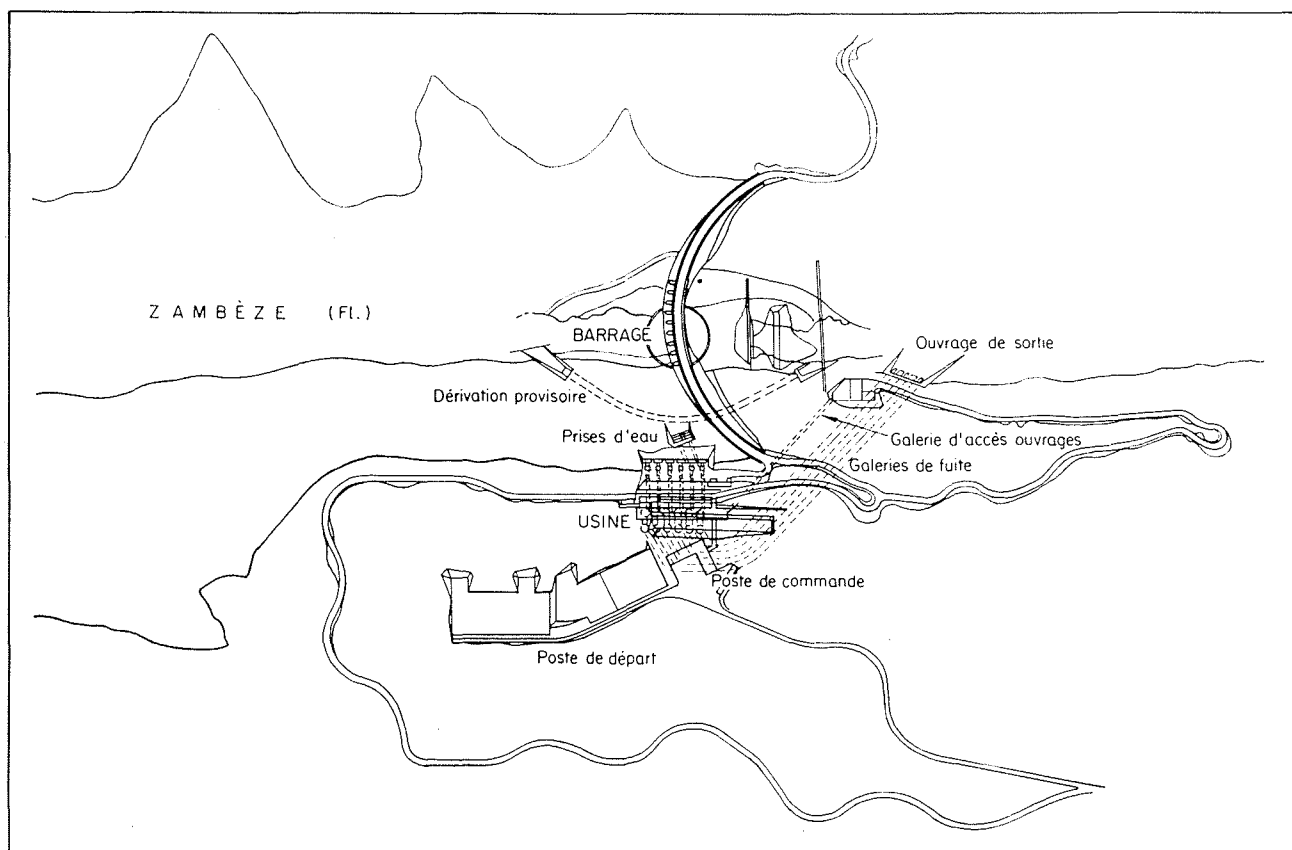


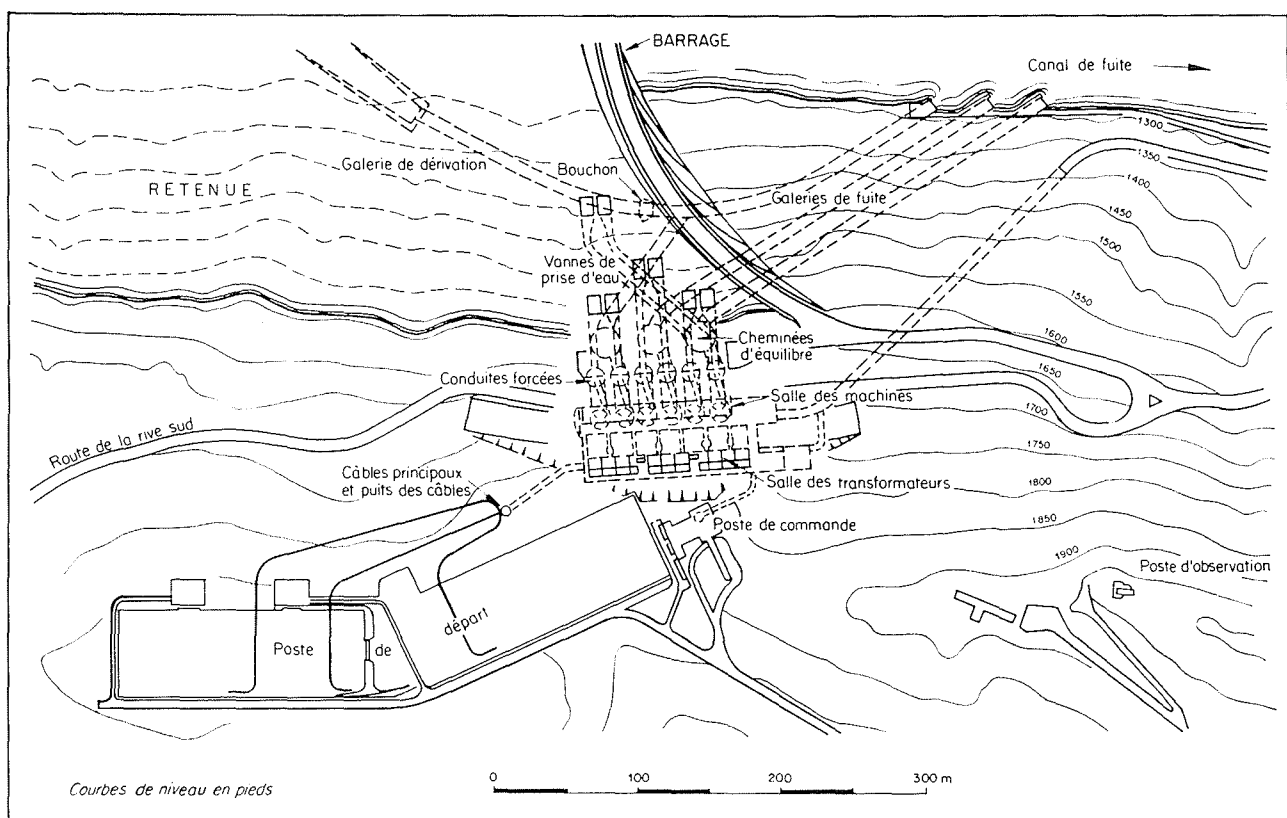
↑ FIG. 5

Projet 1955 : Coupe des ouvrages souterrains.

↓ FIG. 6

Projet 1955 : Vue en plan des ouvrages souterrains.



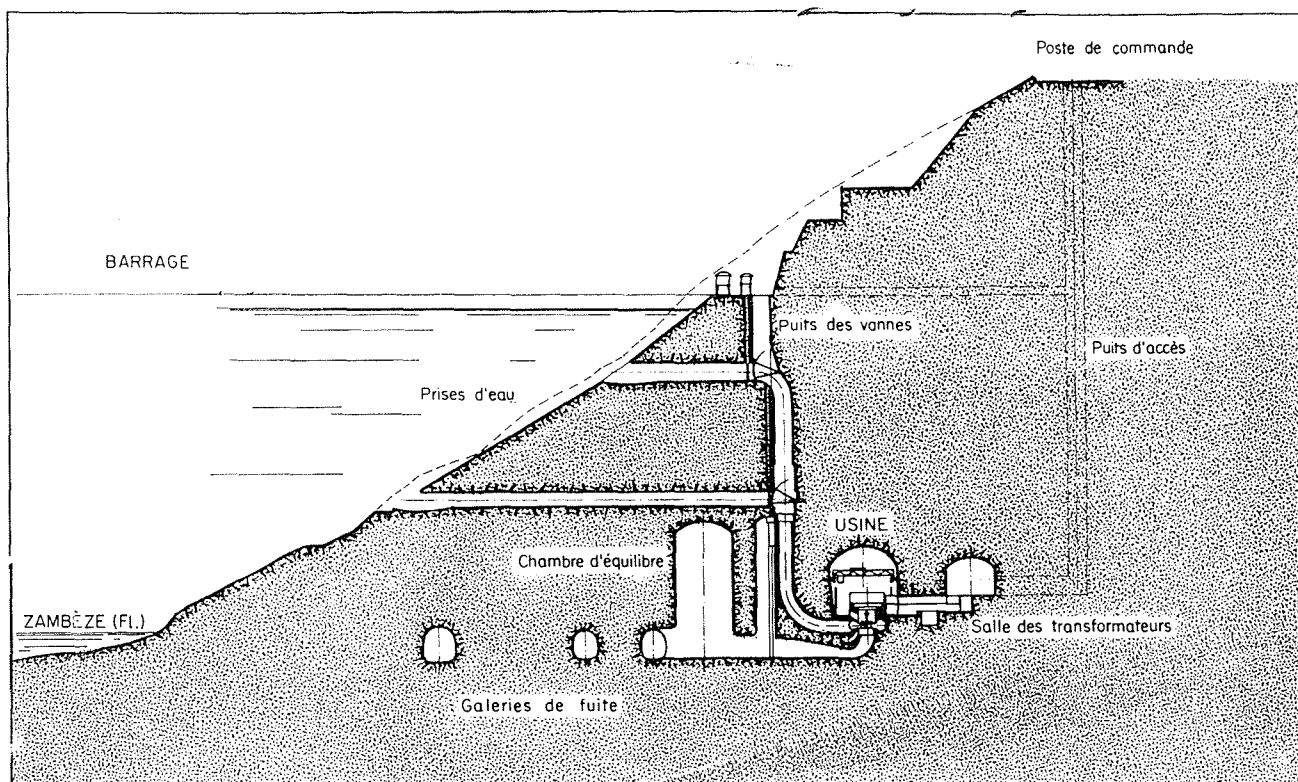


↑ FIG. 7

Projet actuel : Vue en plan des ouvrages souterrains.

↓ FIG. 8

Projet actuel : Coupe des ouvrages souterrains.



tallé le bâtiment de commande, relié directement à l'usine souterraine par un puits contenant un ascenseur ainsi que la filerie de commande et de contrôle.

Suivant ces dispositions générales, trois projets successifs ont été étudiés pour les ouvrages souterrains.

1. — Le *premier projet*, de décembre 1955, a prévu pour un niveau de retenue normale de 474 m :

- 6 prises d'eau définitives au même niveau et deux prises provisoires basses,
- 6 puits d'alimentation verticaux (partie supérieure bétonnée, diamètre 6 m, partie inférieure avec un gainage métallique 5 m),
- L'usine souterraine, où les conduites d'alimentation entrent côté fleuve et les conduites de restitution sortent côté montagne. La galerie des transformateurs est disposée côté fleuve.

Le rocher étant supposé de bonne qualité et suffisamment compact, l'usine est constituée d'une voûte de 12 m de rayon avec 1 m d'épaisseur à la clé, prolongée par des murs latéraux de faible épaisseur (50 cm),

- 6 puits de manœuvre des batardeaux à l'aval des aspirateurs, servant également de cheminées d'équilibre, avec une section horizontale sensiblement égale à la section minimum définie par la formule de Thoma, pour la stabilité des groupes,
- Enfin 3 canaux de fuite, qui contournent l'usine avant de rejoindre le fleuve, avec un parcours de 400 à 450 m.

2. — On rechercha cependant une autre disposition qui permette de diminuer la longueur de ces canaux de fuite.

Dans le *projet suivant*, d'avril 1956 :

- Les canaux de fuite sont rapprochés de la rivière et leur longueur réduite à 150 m environ, en utilisant pour la restitution des groupes 5 et 6 la moitié environ de la galerie de dérivation provisoire;
- L'évacuation de l'usine est ramenée du même côté que l'alimentation, ce qui entraîne :
 - l'accolement des puits de manœuvre des batardeaux aux puits d'alimentation,
 - l'éloignement sous la montagne du hall des transformateurs.

Dans ce projet, l'exécution des excavations est

un peu délicate. Mais ce désavantage est compensé par l'économie sur la longueur des canaux de fuite.

3. — Le *projet actuel*, enfin, a légèrement modifié le précédent :

- Le raccourcissement des canaux de fuite a amené à reconsidérer le problème des cheminées d'équilibre, l'application de la formule de Thoma devenant plus délicate.

Les calculs ont été repris par la SOGREAH et ont conduit à adopter, par ensemble de deux machines, des cheminées de gros diamètre (20 m environ). Pour assurer leur stabilité pour toutes les conditions de fonctionnement (variation du niveau aval de 22 m), cette large section a été conservée sur toute leur hauteur.

- Les prises d'eau ont été modifiées :

- La cote de retenue normale a été montée de 6 m et portée à 480 m;
- Les prises d'eau provisoires et définitives ont été disposées de façon à pouvoir être desservies par la même voie de dégrillage;
- Deux prises d'eau définitives ont été décalées vers le bas, à un niveau intermédiaire, pour pouvoir turbiner plus tôt pendant la période de remplissage;
- On a finalement retenu des vannes secteur, plus sûres en exploitation.

- De plus, la forme et le revêtement de l'usine ont changé.

En effet, au fur et à mesure de l'avancement de l'excavation, le rocher est apparu moins homogène. En conséquence, les revêtements prévus en voûte ont été prolongés vers le bas. Les murs ont été épaissis, avec un renforcement par des piliers en béton armé descendant jusqu'au bon rocher.

Voici quelques chiffres, sur les ouvrages souterrains :

Salle des machines, 40 m haut, 26 m large, 135 m de long équipée de deux ponts roulants de 250 t, permettant, couplés, de manœuvrer les rotors d'alternateur, pesant chacun 450 t.

- Cheminée d'équilibre : 38 m haut, 20 m de diamètre, capacité totale : 32 000 m³.

L'ensemble des ouvrages souterrains comporte un volume d'excavations de 570 000 m³ et un volume de béton de 135 000 m³.

VI. — DÉROULEMENT DES TRAVAUX

Le programme des travaux en rivière a fait l'objet chez la SOGREAH, d'une série d'essais sur modèle, qui ont permis de définir les diffé-

rentes phases et de les adapter, en fonction du régime de la rivière.

Ces phases sont les suivantes :

1. D'abord percement sur la rive droite d'une galerie de dérivation pour faciliter le passage des débits de basses eaux;
2. Ensuite construction sur la plage rive gauche, au cours du premier étiage, d'un batardeau semi-circulaire, à l'abri duquel seront coulés les plots latéraux du barrage, en y laissant quatre pertuis;
3. Puis, au cours d'un deuxième étiage, dérivation du fleuve par ces quatre pertuis, et coupure du lit mineur;
4. Ensuite construction d'un batardeau central circulaire isolant les fondations du barrage dans le lit mineur;
5. Enfin, au cours d'un troisième étiage, fermeture de la galerie de dérivation rive droite, puis des quatre pertuis rive gauche.

Nous allons voir maintenant comment ce programme a été réalisé :

Année 1955.

En juin 1955, commençaient les premiers travaux, comportant notamment :

- Des reconnaissances complémentaires,
- L'exécution de la galerie de dérivation provisoire rive droite (longueur 400 m - section 100 m² - non revêtue), percée à partir d'une galerie d'accès inclinée;
- La construction sur la rive gauche, hors du lit mineur, du batardeau semi-circulaire de première étape : voûte en béton de 180 m de diamètre - 290 m de longueur - hauteur maximum 18 m, construite sur des fouilles de 5 à 6 m remplies de colerete. L'épaisseur de ce batardeau était de 1,80 m à 2,40 m dans la partie centrale; le volume des bétons : 10 000 m³ environ,
- L'exécution d'un chenal rive gauche à l'amont et à l'aval de ce batardeau.

En même temps, étaient passés une série de marchés concernant les cités, les routes, le terrain d'atterrissage, les transports, les fournitures, etc. Il fallut faire, pour se raccorder à la grande route venant de Salisbury, près de 200 km de routes dont 40 km dans la zone du chantier, où la topographie imposait un large étalement des divers services et installations.

Pour la communication entre les deux rives, on construisit une passerelle suspendue pour piétons — puis un pont de bateaux provisoire, remplacé ensuite par un pont-route.

Une sablière était trouvée sur les bords de la Sanyati, affluent rive droite, à l'amont. Après de nombreuses recherches, la carrière définitive était reconnue sur la rive gauche à 3 km du site.

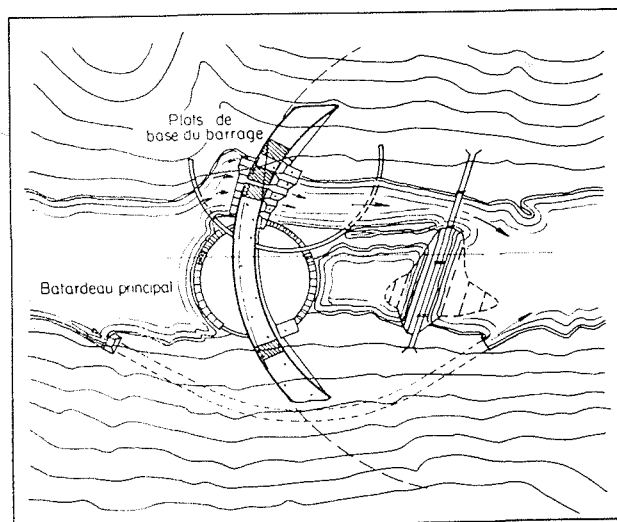
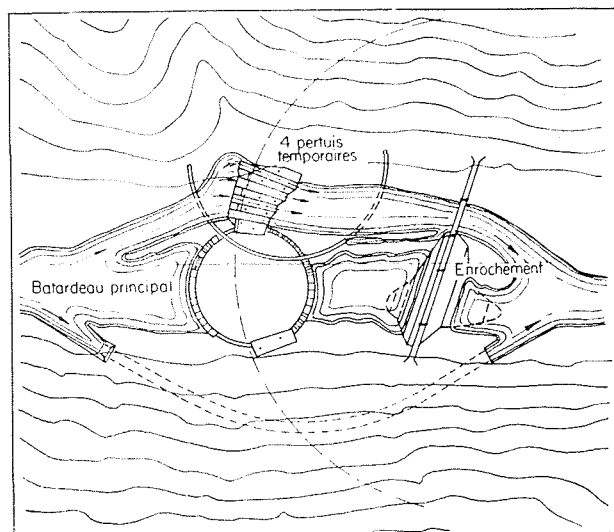
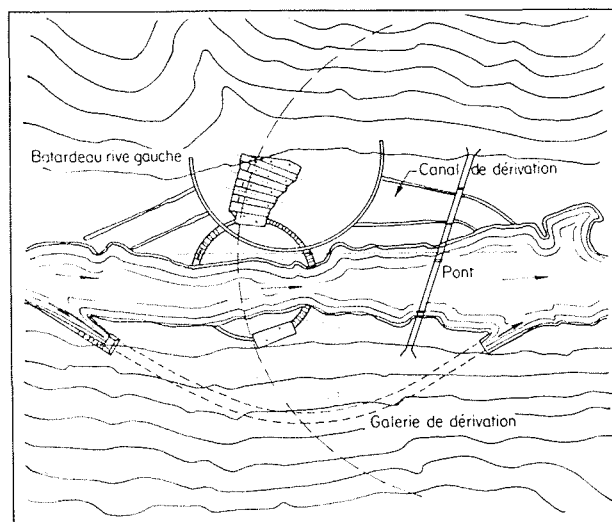


FIG. 9
Phases des travaux.

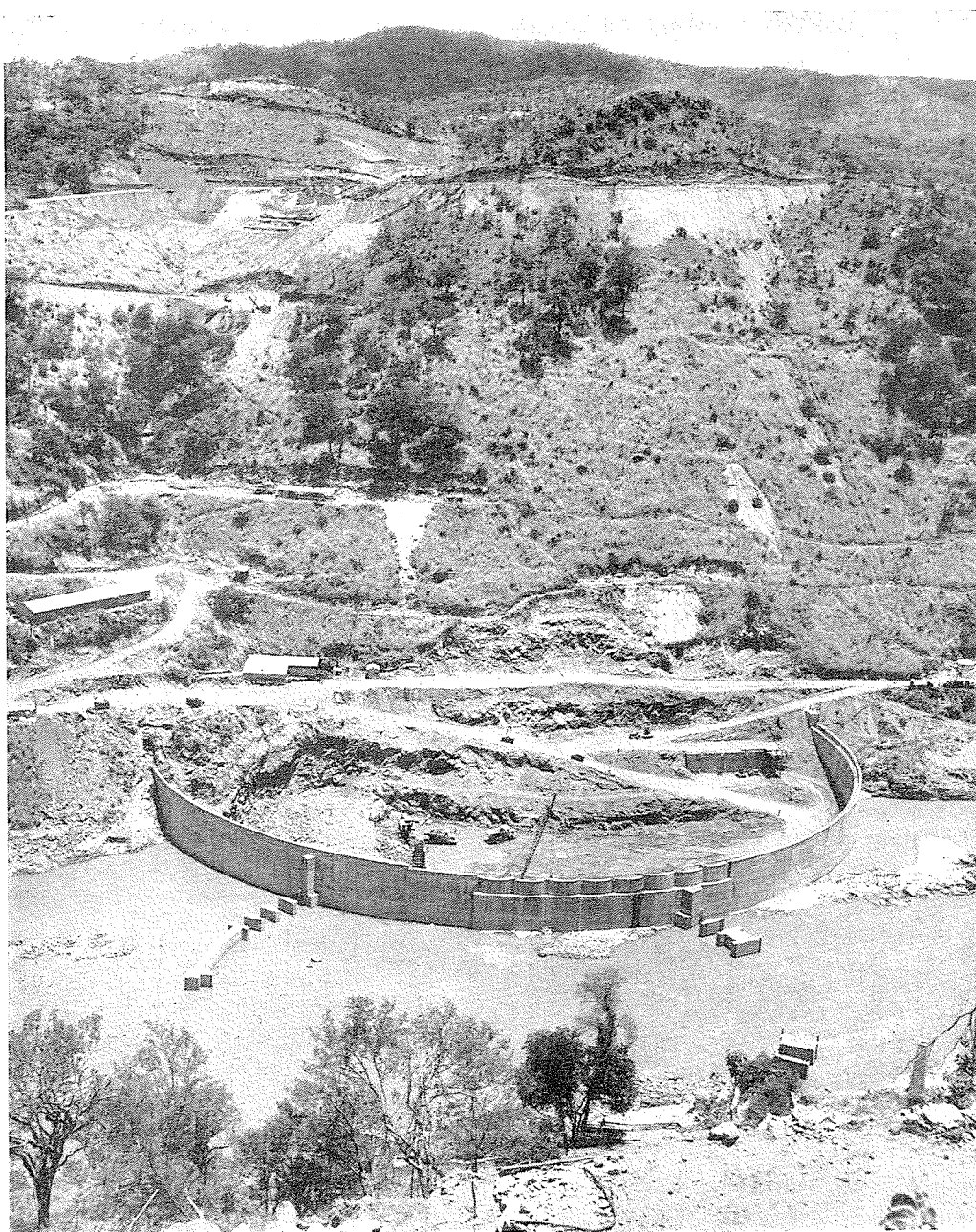


FIG. 10
Batardeau
rive gauche
(décembre 1956)

Année 1956.

En mars 1956, la crue atteignit 3 500 m³/s. Elle emporta le pont de bateaux, mais ne fit guère d'autres dommages.

En juillet 1956, les travaux principaux de génie civil étaient confiés à un groupe d'entreprises italiennes : IMPRESIT.

En même temps, étaient passés les marchés de l'équipement principal (turbines, alternateurs, transformateurs, etc.), ainsi que les marchés de construction des 930 miles de lignes à haute tension. La fourniture des conduites forcées, vannes de prises d'eau, vannes du barrage, fut confiée aux Etablissements Neyrpic.

La dérivation provisoire rive droite et le batardeau semi-circulaire furent terminés dans le deuxième semestre 1956, et le batardeau deuxième phase, amorcé sur les deux rives.

Par ailleurs furent percées deux galeries pilotes sur la longueur de l'usine souterraine avec une branche vers le hall des transformateurs. On entreprit le tunnel d'accès à la centrale à pleine section.

Enfin fut commencée la réalisation des installations de chantier définitives qui comportent :

1. — SUR LA RIVE DROITE :

— Une installation de stockage, lavage, criblage du sable et des fins venant de la Sanyati, avec

un stockage de 530 000 m³, suffisant pour les besoins du bétonnage lorsque la sablière sera submergée par les crues puis par la montée de la retenue;

- Une installation de refroidissement du béton des plots du barrage;
- Une installation secondaire de bétonnage pour les travaux souterrains.

2. — SUR LA RIVE GAUCHE :

- Une installation de préparation des matériaux venant de la carrière : concassage en deux étapes, criblage, lavage et stockage en quatre dimensions entre 8" et 1/2" (20 cm - 1,3 cm);
- Une installation de stockage du ciment fourni en totalité par les cimenteries rhodésiennes, et transporté principalement en vrac, partiellement en sacs; la capacité de stockage est de 26 000 t;
- Une installation principale de bétonnage de 360 cu/yds par heure (275 m³/h);
- Trois blondins de 8 cu/yds (6,1 m³) pour la mise en place du béton sur le barrage, installés en 1957 et 1958.

Année 1957.

La crue de mars 1957 eut un débit de pointe de 8 400 m³/s. Le batardeau rive gauche fut noyé, mais on put le remettre à sec en six semaines; à part ce retard, il n'y eut pas d'inconvénients graves.

Au début de juillet, les plots rive gauche atteignaient la crête du batardeau, dont on put faire sauter les extrémités amont et aval, ce qui permit de dériver une grande partie du fleuve dans le chenal rive gauche à travers les quatre pertuis prévus dans le barrage. Le sautage de ce batardeau fut un succès total; préparé par des brèches pour la partie haute au-dessus de l'eau, il fut terminé par un pétardage sous l'eau (3 tonnes de dynamite dans 440 trous).

En même temps on constitua, à l'aval, par déversement du haut du pont-route, un batardeau en enrochements (environ 100 000 m³) destiné à couper le courant dans le lit mineur pour y exécuter, en eau calme, le battage des palplanches devant servir pour l'exécution du soubassement du batardeau circulaire de deuxième étape.

On constitua ainsi deux enceintes, chacune composée de deux rideaux concentriques distants de 6 m, reliés par des cloisons formant une série de cellules. Les palplanches (1 000 t) furent battues à refus, à travers les dépôts de surface, jusqu'au rocher, puis les cellules furent remplies de colcrete et soigneusement injectées; on réalisa ainsi, sans avoir eu à faire d'épuisements, deux voûtes en béton en travers du lit mineur. A l'amont et à l'aval des enceintes, fut

disposé un remblai tout venant pour réduire les risques d'infiltrations.

Entre ces enceintes, le lit mineur fut à sec fin novembre 1957.

On construisit alors sur ces deux enceintes le batardeau circulaire de deuxième étape en béton. Cette structure vraiment impressionnante, d'un diamètre de 115 m et d'une hauteur maxima de 25 m, avait une épaisseur de 1,80 m à l'amont, variant de 3,60 m à 1,20 m de bas en haut, à l'aval. Ce batardeau s'appuyait de chaque côté sur un plot du barrage. La différence de niveau entre l'amont et l'aval pouvait atteindre 10 m.

Sur les rives gauche et droite, on continua les fouilles du barrage, sans grande surprise en ce qui concerne la qualité de la roche.

Par ailleurs, les travaux souterrains : hall de l'usine, galeries horizontales et puits de prises d'eau, furent conduits très activement. La voûte supérieure de l'usine fut attaquée et bétonnée à partir de galeries pilotes, puis l'excavation fut conduite en descendant.

Le rocher, dans la zone des prises d'eau, s'est révélé hétérogène, le gneiss étant, dans la partie supérieure, recouvert d'une grande masse de quartzites fortement plissés. Il fallut faire des travaux de confortement sur la pente des prises d'eau, et augmenter le ferrailage des puits.

Dans la zone des cheminées d'équilibre et des puits de batardeaux aval des turbines, l'excavation fut retardée par les précautions nécessaires d'une exécution prudente. Il semble au contraire que les canaux de fuite ne nécessitent pas de revêtement.

Année 1958.

Au début de 1958, trois plots de barrage (sur six) étaient en cours de construction dans le lit mineur à l'abri du batardeau circulaire. C'est alors que survint la suite des crues catastrophiques qui s'étendirent sur février et mars, s'élevant de 5 200 m³/s le 7 février à 16 000 m³/s le 5 mars (avec un niveau dépassant de 20 m environ le niveau moyen du Zambèze) pour retomber à 4 500 m³ en avril.

Le pont-route et la passerelle pour piétons furent emportés, et la communication entre rives ne fut assurée que par les blondins.

Le batardeau circulaire avait d'abord bien résisté, et fut même, à l'amont, surélevé de 3,60 m, mais le 16 février se produisit brusquement sous les fondations de l'extrémité rive gauche, près du contact avec l'ancien batardeau de première étape, une venue d'eau qui remplit l'intérieur en une heure et demie. Tous les ouvriers avaient pu se sauver à temps, mais quelques installations furent noyées. Au moment de la pointe, la crête amont fut surmontée et l'ensemble du chantier submergé, à l'exception des plots latéraux du

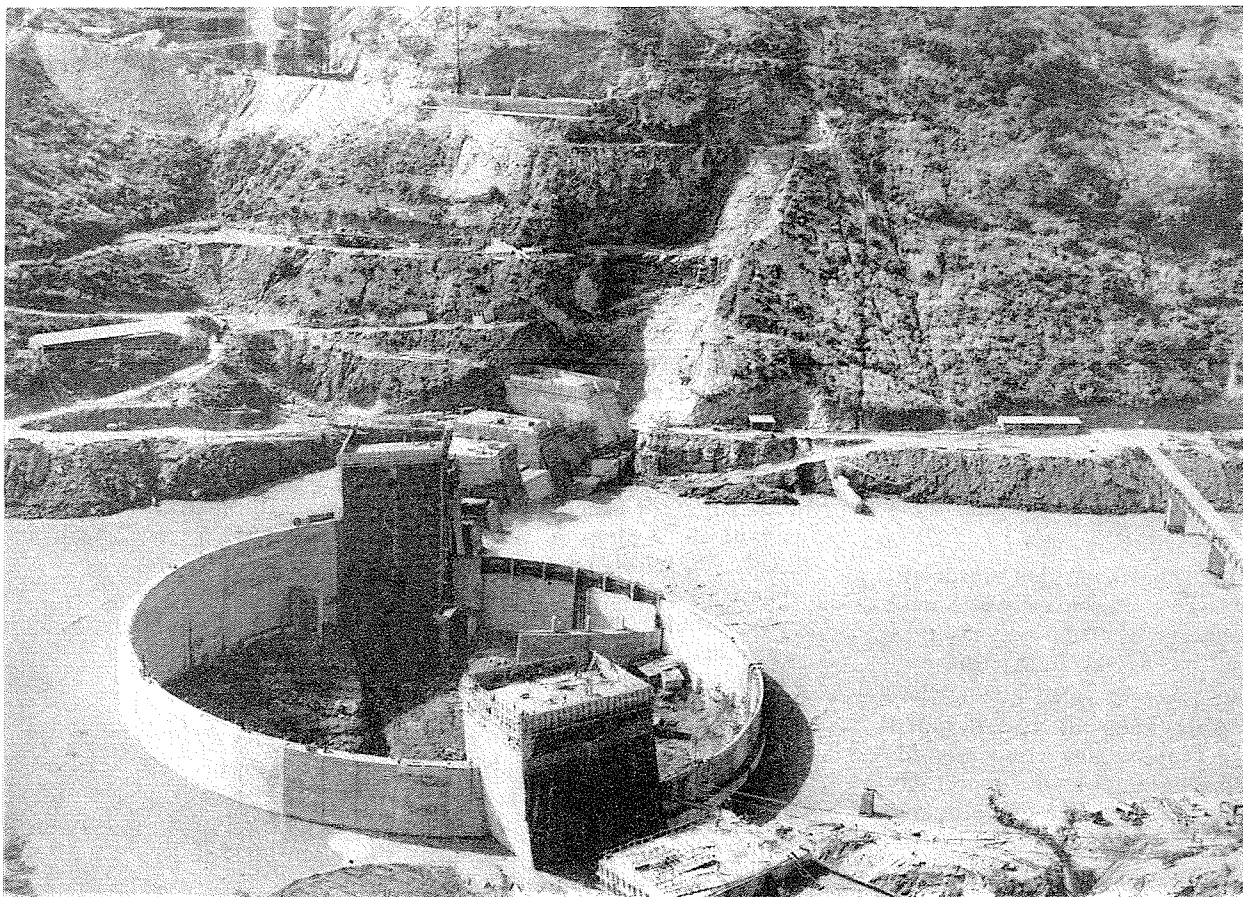


Fig. 11
Batardeau
central
février 1958.

barrage, que l'on avait montés en toute hâte et qui heureusement résistèrent. Sur les rives, les baraques de chantier furent emportées. Par ailleurs, nombre d'accès, ainsi que l'aérodrome provisoire, furent noyés.

Heureusement, les travaux souterrains ne furent pas affectés, subissant seulement un retard de dix jours.

Au fur et à mesure que la décrue s'amorça, on put mesurer les dégâts, mais également reprendre l'effort nécessaire, en tenant compte d'enseignements aussi chèrement acquis.

On démolit d'abord par étapes la crête aval du batardeau circulaire, de façon à diminuer la pression intérieure.

Puis on localisa par des sondages l'emplacement et les dimensions de la voie d'eau. Il s'agissait d'un trou de 4 m² environ qui se forma, sous une charge d'eau de 25 m, dans le fond rocheux, probablement par érosion due au fort courant tangentiel. La charge se stabilisa ensuite à 8 m environ (différence de niveau entre amont et aval du batardeau), avec un débit de 25 m³/s environ.



Fig. 12
Crue
mars 1958.

Après quelques essais infructueux de bouchure par l'amont, on décida de canaliser la voie d'eau à l'aval par deux enceintes latérales de palplanches remplies de béton, à l'extrémité desquelles on fixa une charpente métallique articulée qui servit d'appui à des palplanches. Après obturation, l'eau monta à l'intérieur du canal à un niveau égal au niveau amont de la rivière. En eau calme, le trou fut rempli de gabions, puis on coula un bouchon de béton.

Cette méthode prudente fut couronnée de succès le 3 juin 1958. L'intérieur du batardeau fut alors pompé, et l'on poussa le bétonnage des plots centraux.

La passerelle pour piétons fut rétablie dès avril et un nouveau pont-route fut construit, légèrement à l'amont de l'ancien, et mis en service en septembre 1958.

Le programme des travaux fut révisé pour s'efforcer de respecter le délai initial, à savoir

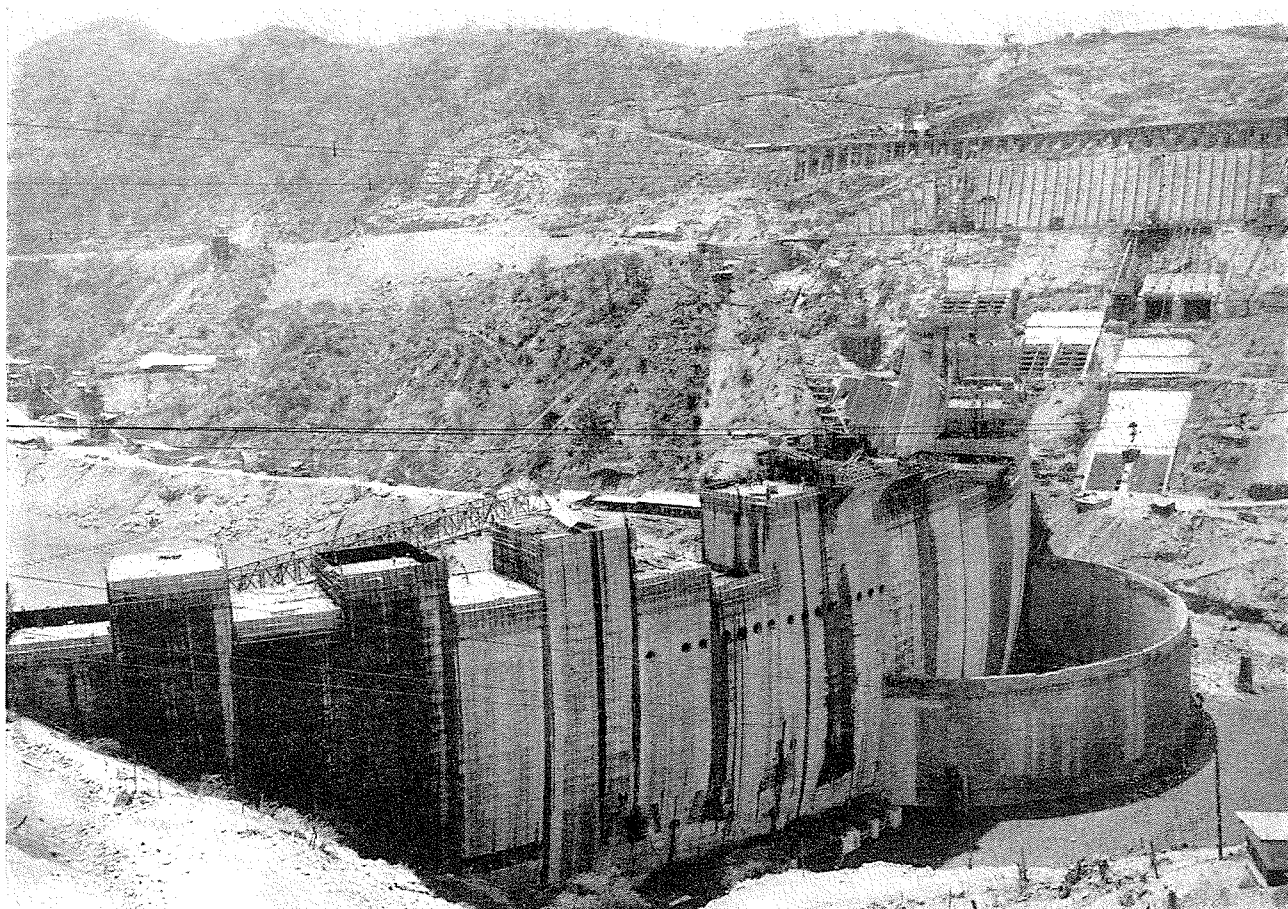


FIG. 13

Etat actuel du barrage (novembre 1958).

la mise en service du premier groupe début 1960, mais en tenant compte de l'éventualité, en 1959, d'une crue analogue à celle de 1958.

Ce nouveau programme a prévu :

- L'installation au barrage de deux pertuis déversants supplémentaires, ce qui en porte le total à six;
- L'accélération de la cadence de bétonnage du barrage;
- L'accélération des travaux sur les prises d'eau, dont, en cas de répétition de la crue

catastrophique, certains éléments doivent être terminés plus tôt que prévu initialement. A cette occasion ont été commandés des batardeaux métalliques supplémentaires, à l'abri desquels seraient terminés les travaux dans les puits.

Il a fallu, en conséquence, augmenter les effectifs (ils atteignent actuellement 1 600 Européens - 8 000 Africains), et renforcer les installations de chantier. Il a fallu également trouver en Rhodésie de nouvelles sources d'approvision-



Fig. 14
Usine
souterraine.
(novembre 1958)

nement en ciment, puisque la consommation en devrait être répartie sur une période plus courte avec des pointes plus fortes. En octobre, le taux de bétonnage au barrage a atteint $65\,000\text{ m}^3$ avec une pointe journalière de $3\,000\text{ m}^3$. A fin octobre 1958, on avait mis en place au barrage $550\,000\text{ m}^3$ de béton (sur les $1\,000\,000\text{ m}^3$ totaux).

Les difficultés paraissent maintenant surmontées, grâce aux efforts de l'entreprise, grâce surtout à la compréhension et aux décisions coura-

geuses du Federal Power Board et de son président, Mr. Anderson.

L'excavation et le revêtement de l'usine souterraine sont à peu près terminés. L'installation de la première machine est en cours, avec le pont roulant mis en place depuis quatre mois. Les autres travaux souterrains, ainsi que la construction du poste et du bâtiment de surface, sont conduits à un rythme accéléré.

Les fabrications et les montages du matériel

électrique et mécanique, ainsi que la construction des lignes 330 kV, suivent dans l'ensemble le programme

Actuellement, le tunnel de dérivation provisoire rive droite est obturé (enrochements à l'aval, palplanches à l'amont). Il sera fermé par un bouchon en béton.

On vient d'installer à l'amont des quatre pertuis rive gauche du barrage, qui constituent le dernier écoulement du fleuve, une charpente métallique formant grille devant laquelle la bouchure sera réalisée par déversement de matériaux, en commençant par des gros et en terminant par des sables et des fins. La mise en place commencera côté rive et se terminera côté fleuve.

La fermeture doit être ainsi achevée vers la

fin de l'année 1958; elle sera complétée par la construction de bouchons en béton dans chaque pertuis.

Le Zambèze sera alors coupé et commencera à former le plus grand lac qui ait été créé de main d'homme.

COMMENTAIRES

Président : M. CAILLEZ

M. le Président remercie M. LABORDE-MILAA de son exposé extrêmement intéressant qui, non seulement, nous a fait pénétrer dans la technicité du projet, mais nous a aussi fait vivre de manière très prenante les difficultés que l'entreprise a rencontrées et qu'elle paraît avoir surmontées dans des conditions brillantes.

Aucun renseignement complémentaire n'est demandé à M. LABORDE-MILAA, qui est vigoureusement applaudi.

