Communication

présentée au Comité Technique de la Société Hydrotechnique de France

le 19 mars 1964

ÉTUDE SUR MODÈLE RÉDUIT DE LA COUPURE DE LA RANCE

PAR

R. BONNEFILLE * ET M. JEANNEL *

I. — Introduction.

La construction de l'usine marémotrice de la Rance a posé des problèmes délicats du fait de l'importance des marées et donc des courants dans l'estuaire de la Rance.

Au fur et à mesure que les batardeaux offraient un débouché de plus en plus réduit au passage de la marée, la dénivellation, de part et d'autre des ouvrages, devint de plus en plus importante, et les courants à leur voisinage de plus en plus violents. Le problème de la stabilité de ces ouvrages fut un des principaux à résoudre; il fut abordé grâce à un modèle réduit qui permit de déterminer, pour les différents projets de construction, la dénivellation et les courants au voisinage des batardeaux et les efforts s'exerçant sur les différentes parties des batardeaux.

Ce modèle, à l'échelle du 1/50^e sans distorsion, construit par le Laboratoire National d'Hydraulique à Saint-Malo à proximité du chantier, reproduit l'estuaire de la Rance de l'embouchure, c'est-à-dire depuis Dinard et Saint-Malo, jusqu'à la limite du domaine maritime, à 22 km à l'intérieur des terres, à l'écluse du Châtelier voisine de Dinan (fig. 1).

Après l'étalonnage du modèle, c'est-à-dire après avoir vérifié que pour des lois de marée imposées au modèle côté mer, on obtenait bien tout au long du modèle les variations de niveau et les courants homologues de ceux de la nature, le modèle fut employé pour l'étude de la coupure de l'estuaire de la Rance suivant un premier projet défini par la Région d'Équipement Hydraulique n° 8, devenue depuis Région d'Équipement Marémotrice d'Electricité de France, et ensuite pour toutes les variantes de construction envisagées par les diffé-

rents groupements d'entreprises participant à l'appel d'offres, puis enfin pour l'étude plus détaillée de la coupure effectivement réalisée.

Dans cette note, pour la compréhension des essais sur modèle, nous sommes obligés de décrire le projet d'Electricité de France, qui fit l'objet de l'appel d'offres lancé le 25 mai 1955 et ceux étudiés, quelquefois très succinctement, pour différents groupements d'entreprises, et enfin le projet adopté et réalisé.

II. — Projet de la région d'équipement marémotrice.

L'usine, implantée entre la Pointe de la Brebis et la Pointe de la Briantais (fig. 2), à une centaine de mètres au sud de l'îlot de Chalibert, dans une zone où l'estuaire de la Rance a environ 800 m de longueur, comportait 38 groupes de 9 000 kW. 10 pertuis de vannage, disposés à raison de 5 sur chacune des rives et fonctionnant en charge, permettaient d'assurer les vidages et les remplissages de l'estuaire lors de la réalisation de tous les types possibles d'exploitation des groupes bulbes. Une écluse était prévue sur la rive gauche.

Le projet prévoyait que les ouvrages seraient exécutés à sec à l'intérieur de trois enceintes de batardeaux réalisées en 6 phases (fig. 2) (1) :

PREMIÈRE PHASE : sur la rive gauche, construction d'un batardeau constitué d'un double rideau de palplanches, à l'intérieur duquel seraient construits à sec l'écluse et les cinq pertuis de vannage;

DEUXIÈME PHASE : sur la rive droite, construction d'une enceinte à l'aide d'un double rideau de palplanches, permettant la construction à sec de 5 pertuis de vannage et 9 pertuis de groupe;

TROISIÈME PHASE : après la démolition des branches nord et sud de l'enceinte rive gauche, mise en

* Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou.

1/ Situation géographique.
Geographical position of the site.

2/ Le projet de la Région d'Équipement Marémotrice.
The "Région d'Équipement Marémotrice" project.

service de l'écluse et des pertuis de vannage, et construction des amorces en palplanches de la troisième enceinte;

QUATRIÈME PHASE : après le dérasement de l'îlot de Chalibert et la démolition des branches nord et sud de la seconde enceinte, terminaison des amorces en palplanches de la troisième enceinte;

CINQUIÈME PHASE : cette phase, la plus délicate, concernait la coupure proprement dite; elle était réalisée par la construction d'une première digue

en enrochement, puis la mise en place d'une seconde digue en matériaux fins permettant de battre un rideau d'étanchéité en palplanches; au sud, construction d'un batardeau, constitué d'un double rideau de palplanches;

SIXIÈME PHASE : après assèchement de la troisième enceinte, construction de l'usine.

Pour ce projet, il fut demandé au modèle (2) :

- 1° de vérifier la stabilité des banquettes en enrochement dans lesquelles seraient fichées les palplanches des rideaux des deux premières enceintes;
- 2° de déterminer les dénivellations de part et d'autre de la digue de coupure, afin de rechercher sur un modèle à plus grande échelle la grosseur des enrochements à employer;
- 3° de vérifier que la coupure pouvait être effectuée selon le programme prévu (fig. 3).

Les deux premiers points donnèrent lieu à des essais sur modèle classique en reproduisant à l'échelle les matériaux des banquettes et en mesurant des niveaux à la pointe différentielle. La vérification du programme de coupure constituait en un essai ininterrompu de 30 marées consécutives (30 h à l'échelle du temps modèle), les matériaux étant déversés régulièrement à l'aide de petites bandes transporteurs; ces matériaux modèle avaient un diamètre de 2,1 à 2,5 mm (80 kg nature). L'essai, repris trois fois, montra la possibilité effective de réaliser la coupure avec les matériaux de granulométrie prévue. L'avancement se révéla plus rapide au début, ce qui s'explique du fait de l'influence de la forme des fonds de la Rance, puis, à partir de la 15^e marée, plus lent que prévu, pour la même raison. Il apparut que la coupure pouvait être effectuée un peu plus tôt, à la 27^e marée au lieu de la 30^e.

III. — Variantes proposées. par différents groupements d'entreprises.

Nous ne décrivons pas ici toutes les études des variantes examinées sur le modèle, car bien souvent les entreprises ne vérifiaient qu'un point de détail (3) :

PREMIÈRE VARIANTE :

Le groupement d'entreprises prévoyait la construction de l'usine à l'intérieur d'une seule grande enceinte construite après la mise en service de l'écluse. Les batardeaux de cette enceinte seraient constitués par des blocs préfabriqués en béton de 200 t environ, s'assemblant les uns avec les autres selon un profil prévu.

Cinq profils différents furent essayés. Quatre profils de coupure, utilisables côté mer, seraient soumis aux variations de charges et de courants dues à la marée; le cinquième profil, construit en eau calme, était destiné à isoler le chantier de l'estuaire après la coupure côté mer. Les essais consistèrent à déterminer les conditions hydrauliques (courants et niveaux) pour différents états d'avancement du chantier. Ils permirent au groupement d'entreprises de mettre au point un profil de digue lui donnant satisfaction.

DEUXIÈME VARIANTE (fig. 5).

L'usine était construite en trois enceintes; on devait cependant procéder à la coupure de tout le

3/ Vue générale d'une coupure sur le modèle réduit.
General view of a cutoff on a model.

4/ Profils de batardeau. 1^{re} variante.
Cofferdam cross-section. Design No. 1.

5/ Profils de batardeau. 2^e variante.
Cofferdam cross-section. Design No. 2.

débit de l'estuaire, car la dernière enceinte était fermée avant que l'on disposât d'ouvrages définitifs servant de décharge du débit.

Une première enceinte réduite, réalisée sur la rive gauche, permettait de construire l'écluse de navigation et les deux jetées destinées à protéger l'écluse pendant les phases ultérieures des travaux. On construisait ensuite, à partir de la pointe de la Briantais, une seconde enceinte barrant 350 m de l'estuaire, permettant l'édification de la demi-usine rive droite. Dès l'achèvement de cette enceinte et après la mise en service de l'écluse, on commençait la construction de la troisième enceinte médiane, par la coupure totale de l'estuaire par une digue. La coupure se faisait en partie avec des gabions circulaires, en partie par échouage de caissons; avant l'échouage des caissons, les derniers gabions étaient

construits à l'abri d'une digue perméable en enrochements.

Les essais effectués sur le modèle eurent pour but l'étude de la construction de la digue en enrochements; on détermina les limites admissibles pour l'avancement de la digue avec différentes qualités d'enrochements (de 0 à 220 kg). On nota que la courbure de la digue était une disposition favorable par rapport aux digues rectilignes; à titre indicatif, toutes choses égales par ailleurs, alors qu'une digue rectiligne nécessite des enrochements de 400 kg, une digue courbe ne nécessite que des enrochements de 220 kg. On étudia la mise en place des caissons et en particulier la mesure, au dynamomètre, des tractions sur leurs amarres en cours de manœuvre avant l'échouage.

TROISIÈME VARIANTE (fig. 6).

Ici la coupure totale de la Rance est effectuée par deux ou par trois enceintes. Une première enceinte, réalisée sur la rive gauche, avait un tracé voisin de celui prévu par Electricité de France.

Dans le cas à trois enceintes, la deuxième enceinte, appuyée sur l'îlot de Chaligny, est réalisée sur la rive droite. L'enceinte centrale est ensuite fermée, côté mer, par une digue constituée de 14 caissons échoués sur un massif d'enrochements. Chaque caisson comporte un puits; la fermeture totale est obtenue par obturation des puits. On mesura sur modèle les dénivellations de part et d'autre des ouvrages, les courants au voisinage des étales en vue des opérations d'échouage. On étudia la tenue de la surface de la digue en enrochements, en cours d'exécution ou terminée, et la protection de sa risberme au droit des puits des caissons.

Dans le deuxième cas, à deux enceintes, la coupure entre l'enceinte de l'écluse et l'îlot de Chaligny est réalisée par 14 caissons sans puits échoués sur un massif d'enrochements. La fermeture totale est ensuite effectuée, entre l'îlot de Chaligny et la rive droite, à l'aide d'un grand caisson articulé sur des ouvrages préparés à l'avance. Les essais relatifs à ce cas portèrent sur la manœuvre du caisson; en particulier, on procéda à des mesures d'efforts sur les câbles de manœuvres. Des essais à l'échelle du 1/30^e en canal permirent de vérifier la stabilité des enrochements de la digue et des caissons échoués et leur possibilité d'étanchement.

QUATRIÈME VARIANTE (fig. 7).

Il s'agit d'une coupure partielle par deux enceintes en gabions circulaires. La première enceinte, exécutée sur la moitié rive droite de l'estuaire, permet de construire une moitié d'usine dont on utilisera ensuite le débouché maximal pour faciliter la réalisation de l'enceinte rive gauche.

Les essais portèrent sur :

- recherche de l'implantation d'emprise maximale de la première enceinte, compatible avec la stabilité des enrochements de banquettes de battage (les plus gros enrochements utilisés pesaient 11 kg);
- la mesure des dénivellations pour différentes brèches résiduelles dans la seconde enceinte;
- l'étude de la stabilité des enrochements au pied des banquettes de battage, pour trois situations intermédiaires pendant la démolition de l'enceinte rive droite et la construction de l'enceinte rive gauche.

6/ Profils de batardeau. 3^e variante.

Cofferdam cross-section. Design No. 3.

7/ Profils de batardeau. 4^e variante.

Cofferdam cross-section. Design No. 4.

8/ Profils de batardeau. 5^e variante.

Cofferdam cross-section. Design No. 5.

CINQUIÈME VARIANTE (fig. 8).

La fermeture étant amorcée sur chaque rive par des gabions, la brèche résiduelle serait fermée par des enrochements déversés entre panneaux métalliques verticaux. Les essais, effectués pour des longueurs de brèches de 250 et 450 m, reproduisaient

9/ Profils de batardeau. 6^e variante.
Cofferdam cross-section. Design No. 6.

10/ Profils de batardeau. 7^e variante.
Cofferdam cross-section. Design No. 7.

la fermeture de la brèche résiduelle par tranche horizontale; les enrochements étaient d'abord simplement déversés jusqu'à la limite de stabilité du massif, pour une dimension admissible des matériaux; puis, dès que les entraînements risquaient de devenir importants, on mettait en place une double rangée de panneaux limitant les entraînements de part et d'autre de la digue; le déversement des enrochements était poursuivi entre les deux rangées de panneaux surélevés au fur et à mesure des apports de matériaux. Les panneaux étaient tenus par des rangées d'appuis verticaux servant de pieds à la passerelle à partir de laquelle on déversait les enrochements. Les essais ont montré l'efficacité des panneaux métalliques pour la protection des enrochements. Par contre, il a été difficile d'en déduire des renseignements sur la tenue et la possibilité de réalisation des panneaux eux-mêmes.

SIXIÈME VARIANTE (fig. 9).

L'opération de coupure comporte trois enceintes successives, implantées selon le projet de la Région d'Équipement Marémotrice; elle en diffère par le mode de réalisation de l'enceinte médiane, la fermeture de cette enceinte par la digue nord devant être achevée avant l'ouverture de l'enceinte rive droite.

Avant l'ouverture de l'enceinte rive gauche, une digue sous-marine est réalisée sur toute la largeur de l'enceinte médiane, par clapage de matériaux fins protégés par des cavaliers; elle est élevée par tranches horizontales jusqu'à la limite de stabilité. Après ouverture de l'enceinte rive gauche, la digue est surélevée jusqu'à une cote voisine de + 2. Le sommet de la digue étant protégé par des enrochements de 150 kg, on effectue soit, à partir des deux rives, une coupure à l'avancement par déversement d'enrochements (du fait de l'assise déjà réalisée, le volume de matériaux à mettre en œuvre pour cette coupure finale est beaucoup plus faible que dans la solution proposée à l'appel d'offres), soit on échoue 39 caissons perdus sur la digue sous-marine.

Une autre solution voisine consiste à remplacer la digue de coupure par 4 caissons de grandes dimensions, échoués sur une banquette d'enrochements arasée à — 4.

Les essais ont permis de vérifier la validité de la granulométrie des enrochements à mettre en place par clapage, puis celle des matériaux de la digue à l'avancement (6 à 30 kg). Ils ont mis en valeur la difficulté de tenir les enrochements de 150 kg sous les caissons; ils ont montré la facilité de manœuvre des 4 caissons même dans les cas les plus défavorables.

SEPTIÈME VARIANTE (fig. 10).

Une première enceinte constituée de gabions circulaires en palplanches permettrait d'exécuter à sec une partie de l'usine. Ensuite, en s'appuyant sur la partie d'usine déjà construite, on réaliserait une seconde enceinte rive droite, à l'abri d'une digue de pré coupure joignant l'usine à la rive droite en passant par l'îlot de Chalibert. La partie de la digue comprise entre l'usine et Chalibert serait réalisée avant l'ouverture de l'enceinte rive gauche; la fermeture entre Chalibert et la pointe de la Briantais s'effectuerait après l'ouverture de l'enceinte rive gauche.

Les études sur modèle consistèrent en la détermination des champs de courants et des efforts

11/ Profils de batardeau. 8^e variante.
Cofferdam cross-section. Design No. 8.

12/ Profils de batardeau. 9^e variante.
Cofferdam cross-section. Design No. 9.

auxquels seraient soumis les gabions extrêmes des branches des batardeaux, pour différentes implantations de l'enceinte rive gauche et différentes longueurs des brèches résiduelles dans les batardeaux nord et sud. Les mesures d'efforts étaient effectuées à l'aide de dynamomètres équilibrant l'effort hydraulique sur le modèle réduit de gabion.

HUITIÈME VARIANTE (fig. 11).

Dans cette variante à trois enceintes, les deux enceintes latérales ont une implantation assez proche de celle prévue dans l'appel d'offres, mais sont réalisées en gabions circulaires. L'entreprise voulait se rendre compte de l'intérêt de terminer les batardeaux de l'enceinte rive droite à l'abri de l'amorce de la digue en enrochements dont le prolongement permettrait la coupure finale.

Les essais portèrent d'une part sur les relevés des champs de courants et des efforts sur les gabions extrêmes à divers stades de la construction des deux premières enceintes, et d'autre part sur les conditions de construction à l'avancement de la digue en enrochements, en particulier lors de la coupure finale entre deux périodes de vives eaux avec les deux enceintes latérales fermées. Les essais montrèrent qu'à condition de choisir des matériaux de dimensions suffisantes (2 600 kg), on pourrait réaliser la coupure sans orifices de décharge au début de la marée. Le peu d'intérêt de la digue de précoupure fut mis en évidence; elle n'était efficace qu'au flot pour le batardeau sud et qu'au jusant pour le batardeau nord.

NEUVIÈME VARIANTE (fig. 12) (4).

Dans cette variante, issue de la précédente compte tenu du peu d'intérêt de la digue de coupure, les phases d'avancement des batardeaux sont :

- sur la rive gauche, édification d'une enceinte en gabions cylindriques permettant la construction de l'écluse;
- à partir de la rive droite, construction d'une digue en gabions de 23 m de diamètre;
- à partir de l'enceinte rive gauche et de l'amorce en gabion de la rive droite, construction de la digue de coupure en enrochements.

Les essais eurent pour but de déterminer :

- les poussées totales exercées sur les gabions

extrêmes de l'enceinte rive gauche, dont l'implantation est différente de celle de la 8^e variante;

- la limite d'avancement de l'amorce en gabion de la rive droite, définie par le critère suivant : la pression hydraulique moyenne sur un gabion doit être inférieure à 150 kg/m^2 ;
- les champs de courants et les durées des renverses de courants aux abords des ouvrages pour différentes marées, ceci dans le but de connaître les conditions hydrauliques lors de la mise en place du matériel de chantier de construction de chaque caisson.

DIXIÈME VARIANTE (fig. 13).

Ce projet de coupure de la Rance appelé « Variante janvier 1957 » prévoyait dans l'ordre chronologique les travaux suivants :

- création sur la rive gauche d'une enceinte pour construire l'écluse;
- construction d'un batardeau de coupure arasé à la cote + 14 pour isoler l'estuaire de la mer;
- construction de la digue sud arasée à la cote + 9.

La partie intéressante du projet est la digue nord, formée de caissons en béton armé préfabriqué de 26, 21 ou 16 m de diamètre suivant la profondeur et arasée à la cote + 1, reliés par des gabions de palplanches de 14,4 m de diamètre. Ce batardeau serait construit de la façon suivante : Après dragage, on échoue les caissons en béton armé, ce qui n'obstrue que partiellement l'estuaire. Ensuite on construit jusqu'à la cote définitive + 14, des gabions métalliques de raccordement de façon que l'ensemble caissons gabions forme une digue crénelée laissant passer la marée sur environ 400 m de longueur au-dessus de la cote + 1. On réaliserait enfin la coupure proprement dite en montant progressivement les seuils déversants par tranches de 1 m de hauteur en ajoutant des couronnes de béton remplies de remblai.

Les essais sur le modèle au 1/150^e permirent de déterminer les conditions d'échouage des caissons (courants, durée des étales). Le comportement du remblai des caissons sous l'action des courants fut étudié en canal sur un modèle au 1/60^e; le procédé ne se montra pas satisfaisant.

13/ Profils de batardeau. 10^e variante.
Cofferdam cross-section. Design No. 10.

14/ Profils de batardeau. 11^e variante.
Cofferdam cross-section. Design No. 11.

ONZIÈME VARIANTE (fig. 14) (5).

Cette variante fut étudiée à la demande de la Région d'Équipement Marémotrice conformément au projet établi en mai 1957; son principe est le suivant :

— Après avoir construit, sur la rive gauche, une enceinte en gabions circulaires permettant de construire l'écluse à sec, on édifie une amorce de 3 gabions à l'extrémité nord de cette enceinte et, sur la rive droite, une amorce de 4 gabions de 19 m de diamètre constitués par des palplanches métalliques à âme plate. Le modèle réduit permit de déterminer les limites d'avancement des amorces, compte tenu du critère de pression maximale 150 kg/m^2 .

— Pendant la construction des amorces et ensuite pendant les opérations d'échouage, un caisson niveleur parallélépipédique de $15 \times 22 \text{ m}$ aplanit le rocher suivant un arc de cercle de 600 m de rayon entre les deux amorces du batardeau. Dans le chenal de l'estuaire, où les fonds sont importants, un seuil en béton coulé sous l'eau est arasé à la cote — 10.28 caissons cylindriques en béton armé de 9 m de diamètre sont ensuite échoués aux emplacements préparés par le caisson niveleur. Pour cette opération, le modèle servit à déterminer les durées des étales; ensuite, par des mesures de dénivellation, on s'assura de la stabilité des caissons.

— Des intervalles de 12 m laissés entre les caissons échoués sont fermés, à raison d'un sur deux, à l'aide de « planches de coupe » en béton armé glissées aux étales dans deux rainures diamétralement opposées pratiquées sur les caissons. Ces planches permettent de construire, à l'abri du courant, des cellules de 22,4 m de diamètre en palplanches métalliques, s'appuyant latéralement sur les caissons reliés par les planches. La coupe consiste à boucher les intervalles entre cellules se trouvant dans le chenal de l'estuaire, puis en dernier lieu ceux situés sur les hauts fonds devant l'îlot de Chalibert. La contribution du modèle fut le relevé des vitesses dans les brèches entre caissons et la détermination des durées des étales de façon à préparer le programme de mise en place des planches.

15/ Projet 1960.
The 1960 project.

IV. — Le projet de 1960 (fig. 15) (6).

Nous ne décrirons pas ici ce projet, car il fait l'objet d'une communication présentée par M. Du-houx. Nous dirons simplement que le modèle réduit joua un rôle considérable dans la mise au point du projet, il permit en particulier de déterminer :

- un programme d'avancement des hanches nord et sud du batardeau des pertuis de vannage;
- les limites d'avancement des amorces en gabions de la grande enceinte;
- un programme de mise en place des caissons en béton armé et de construction des cellules;
- les efforts que pourraient subir les ouvrages du batardeau sous l'effet de la houle se propageant dans l'estuaire.

Pendant la construction du batardeau et jusqu'à la coupe définitive en juillet 1963, à chaque marée de vive-eau, la Région d'Équipement Marémotrice effectua des mesures de niveau *in situ*. La comparaison de ces observations nature aux mesures correspondantes du modèle sont très intéressantes du point de vue de la technique des modèles réduits. Une partie de la communication de M. Du-houx est consacrée à ce sujet.

16/

17/

V. — Conclusion.

Cette note a pour but de montrer la contribution d'un modèle réduit dans l'élaboration du programme de coupure de la Rance. De ce fait nous avons dû énumérer les différentes méthodes de coupure étudiées, et avons ainsi été amenés à présenter les diverses variantes envisagées entre les solutions à une enceinte et à trois enceintes, pour finalement aboutir à la solution à une grande enceinte flanquée de deux petites enceintes.

Pour toutes ces études, le modèle fut surtout l'appareil de prédiction des conditions hydrauliques (courants, durée des étales de courant) pour une situation de chantier donnée, et de détermination des dénivelées de part et d'autre des ouvrages. Ces mesures permettaient de calculer les efforts sur les ouvrages. Mais, ensuite, on ne s'en contenta pas et on demanda au modèle de donner directement les efforts; ces mesures délicates ne purent être effectuées que grâce aux moyens d'extensométrie modernes.

Enfin ce modèle a la chance de « vivre » encore,

alors que les travaux se réalisent en nature, ce qui permet d'intéressantes comparaisons. Précisons, pour terminer, que sa proximité du chantier fut un atout majeur pour jouer son rôle d'aide à la mise au point du chantier réel.

Références bibliographiques

- (1) G. MAUBOUSSIN : Construction de l'usine marémotrice de la Rance. Contribution des essais sur modèle réduit à la mise au point d'un mode d'exécution des travaux. Les usines marémotrices françaises, 4^e Journées de l'Hydraulique, Société Hydrotechnique de France, juin 1956.
- (2) Laboratoire National d'Hydraulique, 6^e Compte rendu d'essais sur le modèle de la Rance, 29-8-1955.
- (3) Laboratoire National d'Hydraulique, 8^e Compte rendu d'essais sur le modèle de la Rance, 20-6-1956.
- (4) Laboratoire National d'Hydraulique, 10^e Compte rendu d'essais sur le modèle de la Rance, 18-2-1957.
- (5) Laboratoire National d'Hydraulique, 12^e Compte rendu d'essais sur le modèle de la Rance, 4-3-1957.
- (6) Laboratoire National d'Hydraulique, 16^e au 34^e Compte rendu d'essais sur le modèle de la Rance (1960 à 1963).

Abstract

A model study of the damming of the Rance By R. Bonnefille * and M. Jeannel *

I. — Introduction.

The considerable tides and currents in the Rance estuary caused a number of delicate problems as regards the construction of the tidal power plant, for as the cofferdamming of the estuary progressed, the water level difference across the structures gradually increased due to the continually decreasing size of the opening available to the tidal flow. One of the most important of these problems, how to ensure the stability of these structures, was studied on an undistorted 1:150 scale model at Saint-Malo near the actual site (fig. 1), which was also used to investigate the various damming schemes for the estuary.

II. — Electricité de France scheme.

The 800 m long power plant section with thirty-eight 9,000 kW units, ten gated sluiceways and a navigation lock on the left-bank side were to be built on dry land behind three cofferdams, which were to be erected in six phases (fig. 2). The model was used to check the stability of the rock fill platforms, to ascertain the water

* Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou.

level differences across the barrage, and to see whether the closure could be carried out according to the proposed programme (fig. 3).

III. — Alternatives suggested by various groups of firms.

ALTERNATIVE 1 (Fig. 4).

This provided for the construction of the power plant section inside a single extensive area protected by prefabricated concrete blocks. The model tests served to determine the hydraulic conditions to be expected at various stages of work progress and to design a suitable structural profile.

ALTERNATIVE 2 (Fig. 5).

This provided for the construction of the power plant section in three separate protected areas. The purpose of the model tests was to investigate the construction of the rock fill dyke and to ascertain the tensile stresses affecting the cables used to tow and anchor the caissons in position.

ALTERNATIVE 3 (Fig. 6).

This provided for either two or three cofferdammed areas across the Rance. In the former case, the middle area was to be closed off by a dyke made up of caissons stranded on a rock fill foundation structure, the closure then being completed by filling up the openings between the caissons. The model was used to measure water level differences and currents and to investigate the behaviour of the rock fill foundation structure. In the layout featuring two cofferdammed areas, total closure was to be achieved by means of an articulated caisson, the handling conditions for which were studied on the model.

ALTERNATIVE 4 (Fig. 7).

This provided for the closure of the estuary by two sites protected by circular gabion cofferdams. The model tests served to measure water level differences under various conditions and to study the stability of the rock fill at the foot of the pile driving platforms.

ALTERNATIVE 5 (Fig. 7).

In this alternative, the closure was to start with gabions from both banks outwards, the remaining opening then being plugged by tipped rock fill between steel panels. The model tests featured the closure of the final opening in horizontal layers.

ALTERNATIVE 6 (Fig. 8).

This provided for damming by means of three successive cofferdammed areas and the construction of a submerged dyke with a top rock fill protecting layer before the opening-up of the left-bank area. This was to be followed either by tipping rock fill to progressively complete the closure, or by stranding caissons for the purpose. The possibility of replacing the dyke by four big caissons was also considered.

The model tests served to check rock fill stability and how easily the caissons could be brought into position.

ALTERNATIVE 7 (Fig. 9).

This provided for the construction of part of the power plant section on a site protected by an initial gabion cofferdam, and further construction on a second similar site protected by a preliminary closure dyke. Currents and loads on the outermost gabions were determined at various conditions on the model.

ALTERNATIVE 8 (Fig. 9).

This scheme featured three areas protected by gabion cofferdams, the problem being to find out whether it would be worth while completing the right-bank cofferdams in the shelter of a rock fill dyke. The model was used to determine currents, loads acting on the gabions and conditions for the construction of the dyke.

ALTERNATIVE 9 (Fig. 10).

Successive stages provided for in this scheme were: 1) construction of a gabion cofferdam on the right bank side, 2) construction of a gabion dyke, and 3) construction of a rock fill dyke to complete the closure. The model was used to determine thrust forces on the gabions, how far to build the initial right-bank gabion structure out into the river, also currents and flow reversal duration near the structures.

ALTERNATIVE 10 (Fig. 10).

This provided for a lock construction site on the left bank side, a cofferdam at the + 14 m level cutting the estuary off from the sea, and the construction of the dyke on the south side at the + 9 m level.

The interesting part of this scheme is the north dyke formed of prefabricated reinforced concrete caissons with sheet piling gabions between them. The plan was to first sink the reinforced concrete caissons so as to partly block the estuary and then to build the interconnecting gabions so as to form a crenelated dyke, after which the final closure would be achieved by installing the sluiceways.

Conditions for the stranding of the caissons were investigated on the model.

ALTERNATIVE 11 (Fig. 11).

In this alternative, the lock cofferdam was to be erected first, followed by the initial cofferdam structures. With the latter under construction and the caisson stranding operations in progress, the rock between the two initial cofferdam structures was to be levelled off with the aid of a caisson, and a concrete sill built in the estuary channel up to the - 10 m level. Twenty-eight 9 m diameter reinforced concrete cylindrical caissons were then to be stranded in the positions prepared with the aid of the rock-levelling caisson, the gaps between them being plugged at slack water by reinforced concrete planks. This structure was to enable sheet piling cells to be erected in a position sheltered from the flow.

The model was used to determine how far to extend the initial gabion cofferdam structures, slack water duration, water level differences across the dam, and flow velocities in the gaps between the caissons.

IV. — The 1960 project (Fig. 12).

This has been described in a paper by Mr. Duhoux. The model served an important purpose in the designing of this project by enabling the following to be determined:

- (i) A construction programme for the gated sluiceway cofferdam.
- (ii) How far out to build the initial gabion structures for the main cofferdammed area.
- (iii) A programme for the positioning of the reinforced concrete caissons and the construction of the cells.
- (iv) Stresses likely to affect the cofferdam structures due to waves propagating in the estuary.

It is very interesting to compare observations on site with the corresponding model data. This point is also discussed in Mr. Duhoux's paper.

**Vue générale du chantier
de la Rance : 31 mai 1964**

**The closure of the Rance Estuary :
31/5/1964**

(Photo Doucet-Dinard)