

Communication

présentée au Comité Technique de la Société Hydrotechnique de France

le 19 mars 1964

# LA COUPURE DU RHIN POUR L'AMÉNAGEMENT HYDRO-ÉLECTRIQUE DE RHINAU

PAR

L. PUGNET \* ET E. CAPITAIN \*\*

## Introduction.

Le lit du Rhin entre Bâle et Strasbourg présente un certain équilibre depuis sa régularisation entreprise vers 1930 pour les besoins de la navigation. Il a été possible, par un système continu d'épis, de fixer les bancs de graviers alternativement sur l'une et l'autre rive et de maintenir en permanence un chenal navigable de 75 m de largeur et de 2 m de tirant d'eau minimal. Cependant, toute perturbation introduite dans le champ des épis existants ou dans les berges, conduit très rapidement à des désordres dans le lit du Rhin (affouillements et dépôts de graviers) qui peuvent, s'ils ne sont pas contrôlés, perturber gravement à leur tour les conditions de navigation.

Les occasions de perturber le lit du fleuve sont devenues cependant plus nombreuses depuis la signature, le 27 octobre 1956, de la Convention Franco-Allemande sur l'aménagement du cours supérieur du Rhin entre Bâle et Strasbourg : cette convention prévoyait en effet, pour chaque aménagement nouveau, la création d'une dérivation, c'est-à-dire la coupure du lit par un barrage de retenue et la modification des ouvrages de correction de ce lit pour effectuer la prise et la restitution du débit dérivé et permettre le passage de la navigation.

Deux solutions ont été successivement envisagées pour le barrage de retenue :

- soit construire le barrage (qui est un barrage mobile dans le lit du fleuve);
- soit construire le barrage mobile à sec à côté du lit, et le moment venu, effectuer la coupure du fleuve par un barrage fixe.

La première solution a été adoptée pour l'aména-

gement de Marckolsheim. La construction du barrage mobile, qui s'est effectuée de 1958 à 1961, a nécessité la mise en œuvre d'importants moyens pour éviter de perturber le trafic international (7 000 000 de tonnes en 1960) : création d'une dérivation provisoire, mise en service pendant une longue période d'une drague et d'un remorqueur.

La deuxième solution a été adoptée pour l'aménagement de Rhinau faisant suite à celui de Marckolsheim. Le barrage mobile a été construit à sec à l'abri des digues du Rhin. Les opérations de mise en service de l'aménagement qui, seules, risquent de perturber le lit du fleuve et la navigation, ont été de courte durée (quelques dizaines de jours) et ont pu être entreprises à une période favorable de faibles débits dans le Rhin.

Cette dernière solution présente d'importants avantages :

- d'une part, pour le barrage, exécution facilitée et prix de revient abaissé;
- d'autre part, sécurité pour la navigation par suite de la faible durée des travaux et de la largeur importante de la passe qui peut à tout moment lui être offerte.

On se propose, dans la suite de cet exposé :

- de définir le programme général des travaux de mise en service de l'aménagement de Rhinau;
- d'étudier les principales opérations de ce programme et en particulier la coupure;
- de donner un compte-rendu des conditions dans lesquelles ce programme a été réalisé sur le chantier.

## Disposition générale des ouvrages et programme des travaux de mise en service de l'aménagement.

Les opérations de mise en service sont entreprises lorsque les travaux concernant l'ensemble de

\* Chef du Groupe d'Hydraulique générale du C.R.E.C., E.D.F., Chatou.

\*\* Chef de l'Aménagement de Rhinau à la R.E.H. Nord, E.D.F.

Le matériel nécessaire (pontons du Génie militaire) n'est pas disponible en permanence et cette technique, qui est *a priori* la plus sûre, ne sera appliquée que si l'autre solution ne conduit pas à des résultats satisfaisants.

Les essais entrepris en déversant des petits enrochements de 20 à 75 kg en couches horizontales à la cadence de 2 000 m<sup>3</sup> par jour, montrent que la coupure se réalise très facilement en 6 jours (utilisation de 10 500 m<sup>3</sup> d'enrochements).

— CONSTRUCTION DU CORDON DE COUPURE A L'AVANCEMENT :

La cadence prévue est de 1 000 m<sup>3</sup> de matériaux par jour à partir de chaque rive.

Les essais montrent que la coupure n'est pas possible en utilisant les matériaux des digues du Rhin. Par contre, les petits enrochements de 20 à 75 kg conviennent parfaitement, à condition, toutefois, d'éviter le creusement de la passe restante en préparant avant la construction du cordon, un tapis de petits enrochements de 1 m d'épaisseur et de 20 m de largeur.

Il se produit, à la fin de la coupure à l'avancement, un léger entraînement des matériaux des deux têtes du cordon et un affouillement à l'aval qui ne compromet absolument pas la stabilité de l'ouvrage (fig. 3).

Au fur et à mesure que la largeur de la passe diminue, le niveau monte à l'amont du cordon, pour permettre au débit du Rhin de passer progressivement dans la dérivation du cordon, correspond à celle de la ligne d'eau dans la passe du bouchon amont, soit 170,00; dans ces conditions, la chute au droit du cordon est de l'ordre de 1,60 m, et la cote de la crête du cordon est fixée, par sécurité, à 170,50.

La réalisation de la coupure s'effectue en 9 jours (dont 3 jours pour l'exécution du tapis d'enrochements) et nécessite la mise en place de 15 000 m<sup>3</sup> de petits enrochements au total.

**Manœuvre des vannes du barrage :**

On a vu que les vannes du barrage restent obligatoirement fermées pendant la première phase des travaux pour éviter :

- les dépôts de graviers dans le chenal du Rhin;
- l'érosion des têtes du bouchon amont et les dépôts dans le canal d'aménée;
- les perturbations du lit du Rhin et la gêne causée à la navigation par le courant traversier de la passe d'évacuation des crues.

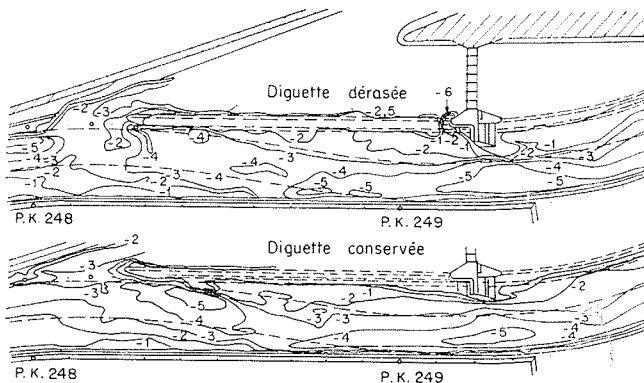
La manœuvre des vannes du barrage doit assurer, pendant la coupure, le passage du débit du Rhin par le barrage; cette manœuvre s'effectue progressivement de façon à maintenir le tirant d'eau minimal de 2 m pour la navigation dans le canal d'aménée. Un tirant d'eau excessif rendrait, par contre, l'exécution de la coupure plus difficile. Le débit soutiré par le barrage, dans ces conditions, est à tout moment fonction du débit total du Rhin et de l'état d'avancement de la coupure. La souplesse de ce réglage permet d'assurer à la navigation des conditions de circulation parfaites en toutes circonstances.

**Eventualité d'une crue de 3 500 m<sup>3</sup>/s :**

Si les conditions hydrologiques laissent prévoir l'arrivée d'une crue supérieure à 2 000 m<sup>3</sup>/s au moment de la coupure, il est préférable de différer

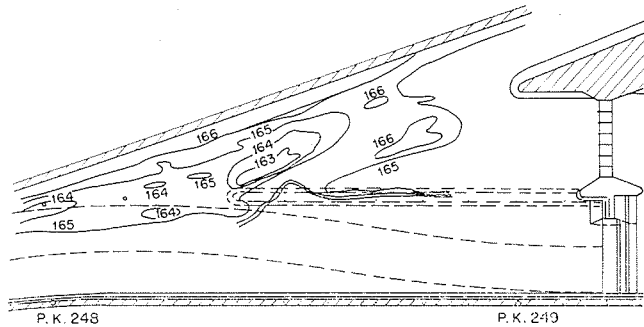


3/ Vue du modèle après la coupure.  
*The model on completion of the cutoff.*



4/ Plans de mouillage de l'entrée de la dérivation à la suite d'une crue de 3 500 m<sup>3</sup>/s survenant au cours de la première phase (résultats du modèle).

*Bed levels at the diversion entrance after a flood flow of 3,500 cu.m/sec. during the first phase (model).*



5/ Relevé des fonds de l'entrée de la dérivation à la suite d'une crue de 3 500 m<sup>3</sup>/s survenant après la coupure (résultats du modèle).

*Depths of water measured in the diversion intake after a 3,500 cu.m/sec. flood on completion of the cutoff (model).*

cette opération. L'arrivée d'une crue de 3 500 m<sup>3</sup>/s ne peut donc être envisagée que pendant la première phase des travaux ou immédiatement après la coupure.

L'effet d'une crue de 3 500 m<sup>3</sup>/s survenant pendant la première phase dépend de la conservation ou de la suppression de la diguette qui surmonte le bouchon amont. Les essais dont les résultats sont donnés par la figure 4, montrent l'intérêt de con-

server cette dernière pour éviter les conséquences du déversement sur la partie aval du bouchon.

On suppose que l'annonce de la crue de  $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$  arrivant après la coupure, laisse le temps de rehausser de 1 m le cordon pour le rendre insubmersible. La crue provoque une érosion de la tête aval du bouchon amont, un creusement de la passe et des atterrissements importants dans le canal d'aménée (fig. 5). A la décrue, on maintient le plan d'eau à un niveau suffisant pour ne pas interrompre la navigation.

Dans le cas où le cordon de coupure ne serait pas rehaussé, le déversement qui en résulterait n'endommagerait pas la partie de l'ouvrage construite en enrochements. Par contre, aux extrémités du cordon qui sont constituées en matériaux du Rhin, des brèches importantes peuvent se produire; une protection locale en enrochements suffit pour éviter leur formation.

### Exécution des travaux sur le chantier.

Les opérations de mise en service devaient marquer l'achèvement de l'aménagement de Rhinau, en chantier depuis 1960. Ces opérations ont débuté le 22 août 1963 après mise en eau des ouvrages.

La première phase a duré 35 jours du 22 août au 26 septembre.

La brèche dans le bouchon amont a été faite au PK 248, 250, 100 m à l'aval de l'axe du canal d'aménée. L'enlèvement du bouchon a été effectué, vers l'amont, par une pelle Marion à la cadence de  $1\,100\text{ m}^3$  par jour et vers l'aval, par une pelle Lima qui s'arrêta au PK 248,400. Au cours de ce dernier travail, un incident mécanique immobilisa quelques jours la pelle, ce qui provoqua l'érosion de la tête aval du bouchon. On fut obligé de laisser sur place une partie des matériaux et de les reprendre ensuite à la drague (fig. 6).

Le 26 septembre, le bouchon amont était ouvert sur 475 m, représentant une passe de 150 m de largeur dans le nouveau chenal navigable.

A cette même date, étaient également réalisés :

- la passe d'évacuation des crues d'une longueur de 217 m;
- l'antenne sur une longueur de 60 m;
- la passe navigable aval sur une longueur de 250 m.

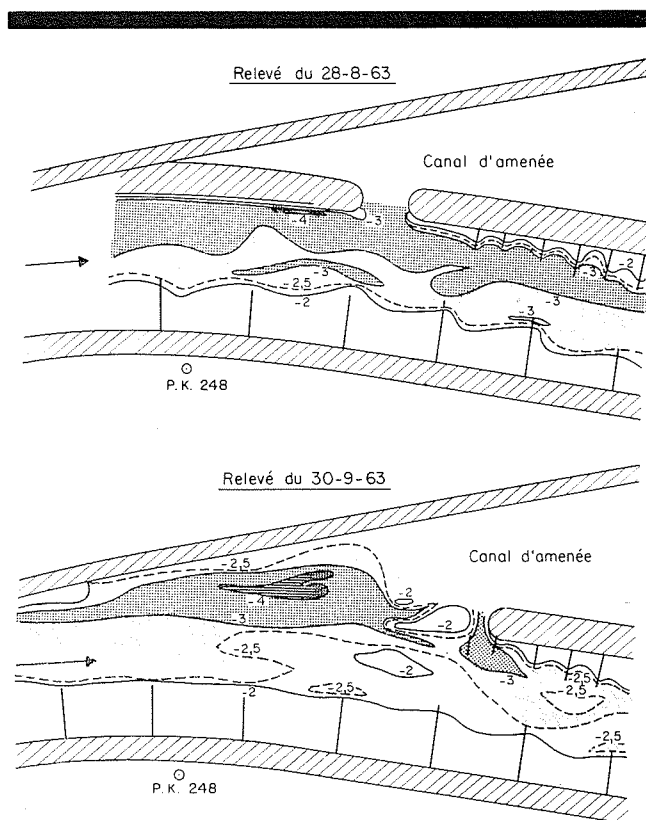
L'examen des plans de mouillage du 27 août et du 1<sup>er</sup> octobre (fig. 7) montre l'évolution de l'ancien chenal du Rhin à la suite de l'ouverture du bouchon aval.

La navigation a été déviée le 26 septembre au matin; le débit dans le Rhin était de  $1\,125\text{ m}^3/\text{s}$ . Aucun incident ne s'est produit.

L'opération de coupure a été réalisée du 26 septembre au 3 octobre, sensiblement dans les conditions fixées par le programme des travaux.

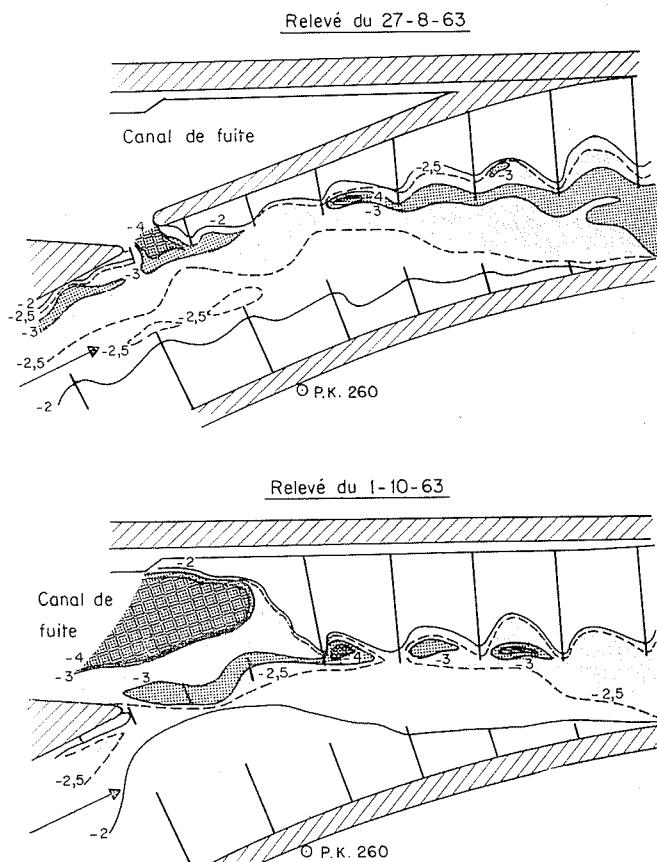
Le tapis de  $2\,800\text{ m}^3$  de petits enrochements a été déposé en 3 jours en utilisant deux chalands à clapets.

Le cordon de coupure d'une section moyenne de  $140\text{ m}^2$ , situé au-dessus du tapis, comportait une plate-forme d'environ 8 m de large à la cote 170,50. Sa longueur, compte tenu de l'antenne déjà exécutée et des accès à la cote 170,50 qui avaient été préparés sur les deux rives, était de l'ordre de 100 m. Des camions déversaient à l'avancement



6/ Plans de mouillage de l'entrée de la dérivation (résultats du chantier).

Bed levels at the diversion intake (site data).



7/ Plans de mouillage de la restitution (résultats du chantier).

Tailwater bed layers (site data).



8/ Vue de la digue de coupure en cours d'exécution.  
*Cutoff dyke construction in progress.*

vers le lit du fleuve (fig. 8). Le cordon a été construit en 4 jours seulement par suite de l'augmentation de la cadence sur la rive droite (2 000 m<sup>3</sup> par jour) où, en plus des moyens courants de chantier, on a utilisé les moyens de chargement des chalands à clapet. 12 600 m<sup>3</sup> de petits enrochements ont été mis en place dans le cordon seul (soit 15 400 m<sup>3</sup> au total).

Compte tenu du débit assez faible du Rhin (de 900 à 1 100 m<sup>3</sup>/s) au moment de la coupure, les vannes du barrage ne furent ouvertes que partiellement à partir du 1<sup>er</sup> octobre.

La troisième phase entreprise aussitôt, a permis de relever progressivement le plan d'eau et d'atteindre, le 20 octobre, la cote de retenue partielle 169 (cote de retenue définitive 173,30).

### Conclusion.

On peut tirer de cette étude deux conclusions :

- l'une particulière et relative à la solution adoptée pour réaliser la coupure;
- l'autre plus générale, relative au projet de l'aménagement du Rhin au dans son ensemble.

\*\*\*

Les essais sur modèle ont conduit, pour la réalisation du cordon de coupure, à une solution mixte comportant les deux solutions classiques de la coupure en couches horizontales et de la coupure

à l'avancement. La solution retenue convient parfaitement au cas de la coupure de Rhinau.

Le tapis d'enrochements permet en effet de s'adapter :

- d'une part, à la situation des lieux en protégeant le lit affouillable et en assurant la stabilité des deux têtes du cordon de coupure à l'avancement;
- d'autre part, aux moyens dont on dispose pour l'exécution des travaux (utilisation de chalands à clapets).

L'absence d'érosion importante des deux têtes du cordon est un autre signe de sécurité et il n'y avait pas lieu de prévoir la mise en œuvre de puissants et coûteux moyens pour assurer une avance particulièrement rapide des deux têtes du cordon : aucune lutte de vitesse avec le courant n'était à envisager dans le cas de la coupure de Rhinau.

Cependant, des conditions particulières de manutention sur le chantier ont offert la possibilité de gagner deux jours sur la réalisation de la coupure en augmentant la cadence de construction du cordon à partir de la rive droite. Il faut encore insister sur le fait que cette accélération des travaux n'était pas due à une difficulté rencontrée dans l'opération de coupure, d'autant plus que le débit du Rhin n'était à ce moment que de 900 m<sup>3</sup>/s.

La solution nouvelle adoptée pour la construction de l'aménagement hydroélectrique de Rhinau s'est montrée pleinement satisfaisante au cours de sa réalisation. Outre la facilité d'exécution à sec du barrage mobile et l'abaissement du prix de revient de cet ouvrage, cette solution a permis d'écourter de façon très importante la durée des travaux dans le lit du Rhin. De ce fait, et par suite de l'étude approfondie du problème, il a été possible de maintenir sans aucune restriction, au cours des opérations de mise en service de l'aménagement, la permanence du trafic de la navigation internationale.

Le projet détaillé des travaux a été présenté avant son exécution à la Commission Centrale du Rhin qui est l'organisme international chargé de contrôler les conditions de navigabilité sur le fleuve. Cette Commission a pu s'assurer que toutes les conditions de sécurité pour la navigation étaient remplies, que le projet permettait d'être maître de la situation en toutes circonstances et qu'il ne resterait aucune possibilité d'improvisation sur le chantier.

Il faut signaler, pour terminer, que les mêmes dispositions des ouvrages sont prévues pour les prochains aménagements hydroélectriques du Rhin.

### Discussion.

Président : M. FISCHER

M. le Président se fait l'interprète des membres présents en remerciant M. PUGNET de son brillant exposé.

Avant d'ouvrir la discussion, M. le Président serait heureux de connaître l'importance de l'économie réalisée grâce au nouveau procédé décrit par M. PUGNET.

M. LEFOULON répond, au nom de la Région d'Équipement Hydraulique Nord d'E.D.F. que l'économie est très importante et se présente sous deux aspects fondamentaux :

1° Le nouveau chantier a été libéré des sujétions qu'avait imposées à Marckolsheim une construction dans le fleuve tout en maintenant la navigation.

Ces sujétions comportent, notamment, la mise en œuvre de remorqueurs de secours pour les périodes difficiles de la

navigation et l'emploi de caissons à air comprimé pour le fonçage des piles.

2° L'exécution des piles à sec est moins coûteuse et permet de prévoir un nombre de piles plus important, donc de multiplier les ouvertures (7 ouvertures de 20 m, dont une de secours, au lieu de 5 ouvertures de 30 m). Ces ouvertures, étant d'une portée moins grande, nécessitent des fondations et des ouvrages en béton d'un volume moins important. Le travail à sec et à une certaine profondeur a pu être assuré sans autre sujétion qu'un pompage tout à fait normal.

De plus, la largeur des pertuis passant de 30 à 20 m, a permis d'utiliser pour leur fermeture des vannes-segments au lieu de vannes-wagons à deux corps; le poids total de la ventellerie a été réduit de 45 %.

M. le Président remercie M. LEFOULON de ces indications et ouvre la discussion sur l'exposé de M. PUGNET.

Sur la demande de M. BLANCHET, M. PUGNET précise que la dénivellation sur le modèle était de l'ordre de 1,60 m en fin de coupure et que les matériaux utilisés, dans tous les cas dont il a parlé, étaient de petits enrochements de 20 à 75 kg, qui ont permis la coupure sous 1,60 m sans avoir d'entraînements notables.

M. LEFOULON ajoute que l'expérience des coupures faites avec succès par la R.E.H. Nord d'ED.F. sur les déviations du Rhin pour les mises en service des chutes d'Ottmarsheim, de Fessenheim et de Vogelgrün avait donné à cette région l'assurance que la coupure du Rhin à Rhinau ne présentait pas de difficultés particulières. Elle était même, dans un sens, plus aisée car, à côté de la digue en construction, on disposait, en plus des déchargeurs de l'usine, du barrage mobile pour régler le débit et dériver, par une manœuvre facile et immédiate, les augmentations de débit jusqu'à 2 000 m<sup>3</sup>.

La coupure pour les quatre chutes précédentes avait été faite, non avec des enrochements comme à Rhinau, mais

avec des gabions de 2 m<sup>3</sup> constitués de galets de plus de 150 mm. Ces gabions étaient mis en place à l'aide d'un pont de bateaux sur lequel circulait une grue équipée avec une pince qui manutentionnait les gabions.

Lorsque l'approvisionnement en enrochements est difficile ou coûteux et que l'on dispose d'une masse d'alluvions par la nature même du lit de la rivière où l'on veut pratiquer une coupure, l'utilisation de gabions pour un tapissage du lit constitue une solution économique.

Sur la demande de M. KIRCHNER, M. LEFOULON indique qu'effectivement la mise en service de la dérivation pour le passage de la navigation avant l'exécution de la coupure et la remontée du plan d'eau, a obligé d'abaisser le seuil amont des écluses de 4 m. Après avoir projeté cet abaissement pour une seule écluse, la responsabilité de ne pas interrompre la navigation internationale sur le Rhin nous a conduits finalement à prévoir cet abaissement sur les deux écluses. Après la montée du plan d'eau à la cote normale, les seuils n'ont pas été relevés; les portes ont donc 4 m de hauteur de plus que nécessaire. Cette disposition a été jugée au demeurant plus économique que toute autre solution.

### Abstract

#### The damming of the Rhine for the Rhinau hydro-electric scheme

By L. Pugnet \* and E. Capitaine \*\*

The 1956 Franco-German convention on the development of the upper reaches of the Rhine between Basle and Strasbourg stipulated that a storage reservoir, a water intake and a tail race canal be provided with every new power station built. Furthermore, work on the river bed was on no account to interfere with the very busy international river traffic (7 million tons in 1960).

The Marckolsheim and Rhinau projects were started in 1956 and were implemented in different ways. The former dam was built in the river bed, which took from 1958 to 1961, and the latter was erected beside the river, only a few days being necessary in September and October 1961 to put the various structures into service. The Rhinau scheme cost less to put into effect than the Marckolsheim scheme, added to which work on the site was much more straightforward and interfered less with river shipping. It is discussed in closer detail in this article.

The operations required to put the Rhinau scheme into service—which were the only part of the work liable to interfere with shipping—were carried out after the main structures had been completed on dry land (especially the sluiceway). They included three phases: 1) the preparation of the river closure by making openings in the dykes immediately upstream and downstream from the dam and downstream from the tail race canal and the construction of a cutoff spur on the left bank, 2) the diversion of shipping through the intake canal and the locks and the construction of the dyke across the river and 3) completion of the final closure dyke. Closure operations were carried out at low water in October, with 2,000 cu.m/sec. as the maximum permissible river flow.

The main operations in this programme were investigated on scale models at the 'Laboratoire National d'Hydraulique' at Chatou.

It was decided to start the opening-up of a navigation channel at the diversion entrance by making an opening near the intake canal centre line. This work proceeded along two 'fronts' one progressing up-river and the other down-river. The opening was completed in forty days and had a final width of 130 m. The dam gates remained shut during the work and were then gradually opened up after diverting shipping to enable the closure to be made. With the upstream part of the dyke completely removed, this was to ensure that no silting would occur in the new channel.

It was also decided to make the flood water sluice downstream from the dam 200 m wide to prevent bank erosion on the German shore, and to build the initial cutoff spur to extend 60 m out from the left bank.

The final closure dyke was to be built working from both banks out into the river, using 20 kg to 75 kg rock fill over a 1 m thick rock fill blanket on the river bed.

Work on the Rhinau site began on the 22nd August 1963. The shipping channel at the diversion intake was completed by the 26th September, also the flood water sluice downstream from the dam, the initial closure spur and the tail race canal back into the Rhine. Shipping was diverted immediately.

The full closure dyke was completed in four days (3rd October), being built on a rock fill protection blanket. 15,400 cu.m of rock fill were used altogether.

The damming of the Rhine at Rhinau is an example of a composite scheme combining the usual 'horizontal layer' procedure and work carried out from the banks into the river. With the facilities available at the site, this enabled small rock fill to be used and operations to proceed in complete safety as no major erosion was experienced at the tips of the two closure spurs.

In view of the successful completion of this work and its complete lack of interference with international river traffic, the same procedure is also to be followed in implementing further hydroelectric projects on the Rhine.

\* Head of the General Hydraulic Group of the C.R.E.C., E.D.F., Chatou.

\*\* Engineer-in-charge of the Rhinau Project of Electricité de France.