Communication

présentée au Comité Technique de la Société Hydrotechnique de France
le 19 mars 1964

FERMETURES FLUVIALES SUR LE RHONE

PAR

P. BAYARD *

Avant d'aborder le principal objet de cette communication, je rappellerai qu'à la fin du siècle dernier, le 3 janvier 1883, une coupure brutale du Rhône, immédiatement en amont de Fort l'Ecluse (situé à 10 km de Bellegarde), fut provoquée par l'éboulement d'une moraine glaciaire de 350 000 m³, entraînant sur 160 m la plate-forme de la voie ferrée Lyon-Genève, dont un petit tunnel de 45 m de long taillé dans cette moraine.

Ce tronçon de voie ne fut définitivement rétabli que 22 mois après l'accident. Cette coupure momentanée fut assez importante pour réduire à quelques m³/s le débit du fleuve et mettre à sec les pertes du Rhône à Bellegarde durant 2 à 3 h. Naturellement, de cette coupure accidentelle, il ne reste rien dans le lit actuel du fleuve, dont les crues digèrent facilement les alluvions de cette moraine.

Après cette coupure accidentelle quasi instantanée, une autre, 56 ans plus tard, fut faite à Génissiat, après de minutieuses études.

Pour cet exemple, comme pour les suivants se rapportant à Seyssel, Rochemaure, Charmes, je traiterai successivement l'exposé du problème, les études et essais sur modèle et la réalisation.

Les conclusions et l'enseignement que l'on peut tirer de ces coupures seront résumées en fin d'exposé.

Génissiat

Je rappelle succinctement le problème.

La dérivation du Rhône était prévue dans deux souterrains de 650 m de long et 80 m² de section. Ces souterrains devaient pouvoir évacuer 2 000 m³/s (la plus grande crue connue), avec une surélévation du plan d'eau amont de 12 m et 1 300 m³/s (crue de 5 ans) sous une surélévation de 7 m. Le lit était étroit (lit mineur 40 m — lit majeur 60 m) et encaissé, sans communication d'une rive à l'au-

tre; l'accès de la gorge était difficile et le Rhône coulait sur 20 m d'alluvions.

Compte tenu du site, de la forte différence de niveau entre l'amont et l'aval nécessitée par la mise en vitesse dans les souterrains (10 m/s pour 1 300 m³/s), et de la nature des matériaux à disposition (matériaux de carrière) il apparut rapidement que la coupure la plus économique était celle exécutée par tranches horizontales, le massif étant à tout moment autostable (fig. 1).

1/ GÉNISSIAT. Croquis des configurations de la construction du massif de coupure.

Cutoff structure configurations.

Les études sur modèles furent confiées au Laboratoire de Grenoble (actuellement SOGRÉAH) en 1938, la coupure ayant été exécutée intégralement au cours du mois d'avril 1939.

La situation des lieux conduisit à faire deux massifs de coupure, le massif aval devant supporter une dénivellation des plans d'eau de 3,40 m et le massif amont, de 1,10 m. Malgré cette réparti-

* Directeur des Travaux et de l'Exploitation des Chutes à la Compagnie Nationale du Rhône, avec la collaboration de MM. CHAUVIN et RAMELLE, Ingénieurs au Centre de Recherches et d'Essais de Chatou.

tion, il s'avéra rapidement lors des essais que le massif aval risquait d'empiéter sur la sortie de la dérivation, sa pente aval ne dépassant pas 4 %. Aussi, pour raidir le talus aval, notre directeur général d'alors, M. Aubert, eut l'idée d'augmenter la rugosité par immersion de tétraèdres métalliques accrochés par des câbles, ce qui permit de raidir la pente du talus aval à 14 % (fig. 2).

Les études théoriques furent faites en s'appuyant sur la méthode d'Isbash.

Les essais à deux dimensions furent exécutés sur un canal vitré au 1/20^e et les essais à trois dimensions sur modèle d'ensemble au 1/40^e.

Compte tenu de la fréquence des débits à l'époque de l'exécution, il fut admis que l'ouvrage en cours de construction devait pouvoir résister à un débit du Rhône de 800 m³/s dont 500 m³/s dérivés et 300 m³/s écoulés par-dessus les massifs. La priorité de construction fut donnée au massif aval (ce qui permettait d'économiser des matériaux sur la partie basse du massif amont).

Tout d'abord, il y eut une excellente corrélation entre les essais et les constatations en vraie grandeur qui furent les suivantes :

On constata quatre phases bien distinctes dans la formation du massif aval (fig. 1) :

- *Première configuration* : formation d'un massif triangulaire; la vitesse de l'eau augmente; il y a formation d'une dénivellation localisée;
- *Deuxième configuration* : il y a un temps d'arrêt dans la progression du massif en hauteur; les pierres roulent sur le talus et viennent engraisser uniquement l'aval;
- *Troisième configuration* : l'ensemble du massif ayant atteint un certain équilibre, l'engraissement se fait sur toute la surface;
- *Quatrième configuration* : lorsque la hauteur de la veine liquide s'amincit, sa puissance d'entraînement n'est plus suffisante pour entraîner les matériaux à l'aval et la hauteur du massif croît très rapidement.

Construction de ces massifs de coupure :

Dans le but de réduire le volume des massifs, la granulométrie des matériaux étudiée sur modèle réduit conduisait à n'employer que des matériaux dont le poids unitaire était compris entre 30 et 300 kg.

Or, il apparut rapidement que, dans la pratique, le respect d'un telle granulométrie était très onéreux, compte tenu de la nature du rocher (calcaire urgonien) et de la place très exiguë dont on disposait dans la gorge; aussi a-t-il été décidé de n'employer que des matériaux de carrière tout-venant, le poids unitaire maximal des gros blocs ne dépassant pas 400 kg.

Dans ces conditions, le volume du massif aval (1) devait passer de 16 000 à 22 000 m³ et le volume du massif amont (2) de 12 000 à 18 000 m³.

Enfin, le nombre de tétraèdres fut également augmenté et au lieu de 300 prévus (3), on en mit 500.

(1) Hauteur : 10 m, largeur à la base : 75 m, longueur en crête : 44 m.

(2) Hauteur : 14 m, largeur à la base : 40 m, longueur en crête : 44 m.

(3) Poids d'un tétraèdre : 130 kg, la répartition optimale était de 1 tétraèdre/8 m² de surface.

2/ GÉNISSAT. Vue du massif de coupure aval (vraie grandeur).

View of the actual downstream cutoff structure.

Le déversement des matériaux se fit à la cadence de 1 000 m³/jour et par train complet, ce qui assurait une assez bonne répartition dans le déversement. Ce massif ainsi constitué a supporté sans dommage un débit de déversement de 9 m³/s par mètre linéaire.

Seyssel

Le barrage de la chute de Seyssel, dont la retenue sert de bassin de compensation à Génissiat, comprend trois passes :

- 2 passes de 43 m de débouché, fermées par des hausses;
- 1 passe déchargeur de 15 m, fermée par des vannes.

Ce barrage est entièrement fondé sur les alluvions, dont l'épaisseur moyenne est de 18 m.

Au moment de la coupure, la situation du chantier était la suivante :

En RG, l'usine est entièrement batardée. Le déchargeur et la passe adjacente à hausses en service; la pile culée RD exécutée. La passe à couper est surmontée du point de circulation des chariots de manœuvres des hausses, pont très important pouvant supporter de fortes charges, tant verticales qu'horizontales.

Enfin, dans le stade définitif, l'amont du radier des hausses était protégé par un rideau de palplanches descendant du rocher.

La cote du lit du Rhône avant coupure était à 8,50 m en contrebas du seuil des hausses. Dans ces conditions, pour un débit de 400 m³/s (débit moyen annuel), la dénivellation entre l'amont et l'aval en fin de coupure était évaluée à 2 m.

Ceci étant, nous avons entrepris dans le laboratoire de la Compagnie Nationale du Rhône à Lyon, des essais sur modèle de la coupure dans deux hypothèses :

- la première, très classique, consistant en un massif construit à l'avancement en matériaux de granulométrie convenable;
- la deuxième, tenant compte de la situation particulière des lieux, et qui consistait à se servir

du rideau définitif en palplanches comme moyen de coupure.

La grande différence des prix de revient : 200 M (valeur 1950) pour la première hypothèse contre 40 M pour la seconde, facilita le choix, et l'étude de détail fut faite sur la deuxième solution que nous allons décrire.

La coupure devant être exécutée en décembre/janvier, on a admis que le battage du rideau de coupure devait pouvoir se faire normalement pour des débits inférieurs ou égaux à 500 m³/s et qu'aucun désordre important ne devait avoir lieu pour des débits inférieurs à 1 000 m³/s.

En fait, le débit oscilla entre 200 et 400 m³/s, sauf pendant 48 heures où le débit atteignit 700 m³/s.

Les difficultés à vaincre dans cette solution étaient :

- d'éviter les affouillements excessifs du lit qui était déjà très bas;
- de guider convenablement les palplanches pour éviter le vrillage du rideau.

Les essais permirent d'arrêter définitivement les dispositions suivantes, qui furent réalisées.

Après épuisement de la fouille pour construction du radier, les palplanches devaient résister à une charge d'eau de 9 m, d'où nécessité de les appuyer sur une poutre située le plus bas possible. Pour limiter la portée de cette poutre et réduire la largeur de la passe de coupure, il parut économique de fonder une petite pile qui substitua à la passe de 43 m, deux passes de 19 m. Cette disposition permit d'utiliser comme rideaux de coupure des Larsen VI, dont une sur deux était renforcée sur le quart de la longueur par des Larsen IV soudées (taux de travail maximal admis : 24 kg/mm²).

Pour lutter contre les affouillements, deux tapis de gabions de 56 m² construits sur pontons et immergés à l'aide du pont, furent mis en place en aval du rideau sur le tiers des passes, côté fermeture.

Enfin, les guides de battage devaient supporter, à l'extrémité d'un porte-à-faux de 10 m, 6 t dans le sens amont-aval et 5,5 t latéralement.

Exécution :

La coupure proprement dite dura un mois : du 1^{er} au 30 décembre 1949. Le travail fut amené à trois postes. Les principales difficultés rencontrées furent :

- d'une part, la manutention et l'approvisionnement des palplanches longues de 32 m et pesant 4 t, les accès à cette passe étant difficiles;
- d'autre part, la mise en place des dernières palplanches de fermeture (la dénivellation entre l'amont et l'aval était alors de 1,80 m), pour laquelle on dut employer un trépidateur de 6 000 kg.

A la fin de l'opération, on constata que les tapis de gabions étaient descendus de 2 à 5 m par suite des affouillements du lit. Les affouillements constatés ont été un peu supérieurs à ceux relevés sur modèle et de ce fait la fatigue des palplanches passa de 24 à 28 kg/mm² (voir fig. 3 et fig. 4).

Enfin, cette coupure, estimée au moment des études à 40 M, revint en fait à 47 M (valeur 1950).

3/ SEYSSSEL. Coupe de la passe au droit du rideau de coupure. Longitudinal section through the cutoff structure.

4/ SEYSSSEL. Coupe transversale au droit du rideau de coupure. Cross-sectional view of the cutoff structure.

Rochemaure

Le barrage de Rochemaure est situé dans le lit mineur du Rhône, au droit de Montélimar. Il comporte 6 passes identiques de 26 m de largeur libre, séparées par des piles de 6 m, et de 30 m de longueur.

Le substratum est constitué par un marno-calcaire assez tendre, recouvert de 4 m d'alluvions.

Le passage des crues et de la navigation implique la construction du barrage en quatre phases.

La coupure décrite ci-après représente l'ouvrage délicat de la quatrième phase; la situation des lieux avant son exécution se présente de la façon suivante :

- les quatre passes de rive droite sont terminées et équipées de leurs vannes en ordre de marche;
- la pile culée de rive gauche est terminée; les trois cellules en palplanches de 10 m de diamètre situées à l'amont et à l'aval de la pile V et ayant servi à la construction de cette pile sur caisson sont encore en place. Avant la coupure, la navigation passe entre cette pile V et la culée de rive gauche, distantes de 58 m;
- il avait été prévu que le massif de coupure qui devait servir de batardeau amont de l'enceinte des passes 5 et 6 serait exécuté en partant de la rive gauche et se fermerait sur les cellules amont de la pile V.

Des essais préalables sommaires, effectués au Laboratoire de Chatou sur le modèle réduit au 1/60^e de l'aménagement montraient que l'exécution de cette coupure avec un débit de 2 000 m³/s était possible en disposant d'un volume de 16 000 m³ de matériaux composés par moitié environ d'alluvions graveleuses et de blocs de 70 kg. Ces essais montraient cependant qu'en fin de coupure, il était nécessaire de déverser de gros enrochements et des gabions.

Exécution de la coupure :

Bien que les essais ne prévoient l'emploi que de 16 000 m³ de matériaux, nous avons jugé bon d'en stocker 22 000, représentant le cube total des massifs amont et aval de l'enceinte à construire.

De plus, 1 000 t d'enrochements et une cinquantaine de gabions furent stockés sur la berge RG.

Le matériel mis en place par l'entreprise se limitait à deux pelles de chargement capables au total de 200 m³/h, de six camions et deux bulldozers (type D 8).

Le démarrage de la coupure fut décidé pour le 11 juin 1957; le débit du Rhône étant de 1 100 m³/s; les prévisions hydrologiques étaient dans l'ensemble assez bonnes, sauf sur l'Isère où l'on s'attendait à des pluies plus abondantes.

Le programme avait été établi pour réaliser la coupure en 108 h, soit à la cadence de 150 m³/h, le débit du Rhône ne devant pas dépasser 2 000 m³/s. Du 11 juin à 17 h jusqu'au 13 juin à 22 h, soit pendant 53 h, la cadence moyenne de déversement fut de 170 m³/h; les prévisions sur l'Isère étaient mauvaises et la vidange de la retenue de Pizançon paraissait inévitable. De plus, une pelle de chargement tombait en panne et le débit de déversement des matériaux tombait à 110 m³/h; il en fut ainsi jusqu'au 14 juin à 13 h. La pelle accidentée remise en service, la cadence reprit à raison de 180 m³/h jusqu'à la fin de la coupure le 15 juin à 11 h 30.

Par contre, les exploitants des retenues de la basse Isère ne purent éviter la vidange de Pizançon et le débit du Rhône atteignit 2 400 m³/s dans la nuit du 14 au 15. Pour limiter le débit, on dériva 200 m³/s par le déchargeur de l'usine, le plan d'eau à l'entrée du canal étant suffisant. Au cours de cette nuit difficile, pendant laquelle le débit aug-

menta de 30 m³ par heure, il fut nécessaire de remonter le massif de coupure, dont la hauteur passait ainsi de 8 à 9 m pour éviter le déversement, ce qui fit régresser légèrement le massif de coupure. Ce cap difficile fut franchi en augmentant le pourcentage d'enrochements et en reconstituant en toute hâte le stock d'enrochements.

Enfin, à partir du 15 juin à 7 h, le débit du Rhône baissa et la coupure se termina à 11 h 30 avec quelques gabions. La dénivellation entre l'amont et l'aval était alors de 1 m environ.

La coupure avait ainsi duré 90 h, nécessitant l'emploi de 16 000 m³ de matériaux.

Les conditions initiales des premiers essais sur modèles ayant été assez largement modifiées par la crue subite de l'Isère, il était intéressant de reprendre en détail l'étude sur modèle de la coupure, compte tenu des conditions d'exécution réelles, afin de s'assurer de la similitude du phénomène. Ces essais sont décrits ci-dessous par MM. CHAUVIN et RAMETTE, Ingénieurs au Laboratoire de Chatou.

Essais de contrôle sur modèle :

Au cours des nouveaux essais sur modèle, on a respecté :

- l'évolution du débit au barrage;
- la géométrie de la digue;
- la cadence de déversement, le volume et la nature des matériaux déversés.

La granulométrie du matériau tout venant (très fin dans la coupure réelle : terre + sable + graviers) à utiliser sur le modèle pour effectuer la coupure en un temps homologue constituait une inconnue du problème.

La coupure a pu être reproduite correctement sur le modèle en adoptant comme matériau tout venant le sable du modèle représentant les alluvions auquel était ajouté, comme pour la coupure réelle, environ 20 % de tout-venant de carrière (0 — 70 kg) et, en fin de coupure, 5 % d'enrochements (poids maximal 400 kg) (fig. 5 et 6).

En faisant varier les quantités et la nature des produits déversés on obtient les résultats suivants :

- a) si le matériau tout-venant est représenté par du sable deux fois plus fin que le sable représentant les alluvions naturelles, la coupure est impossible;
- b) si on ne déverse que du matériau tout-venant, on constate que la coupure n'est pas achevée deux jours nature après l'époque prévue; l'extrémité de la digue atteint à peine la moitié de la largeur à fermer. Les enrochements jouent donc un rôle important;
- c) si on déverse un mélange de 80 % d'alluvions et de 20 % d'enrochements de 70 kg (sans gros enrochements de 400 kg) la coupure est retardée de 5 h 30. Elle nécessite un volume de matériaux supplémentaire de 1 500 m³.

Ces essais montrent, en définitive, que le rythme de déversement, ainsi que les quantités de matériaux et les proportions d'enrochements utilisées pour la coupure présentaient une faible marge de sécurité.

Charmes

Le barrage de Charmes est situé pour un tiers sur la berge rive droite et deux tiers dans le lit mineur du Rhône, à 10 km en aval de Valence. Il comporte

5/ ROCHEMAURE. Vue d'aval du massif de coupure sur modèle.
Downstream view of the model cutoff structure.

6/ ROCHEMAURE. Vue d'aval du massif de coupure en vraie grandeur.
Downstream view of the cutoff structure on site.

7/ CHARMES. Vue en plan du massif de coupure sur modèle.
Plan view of the model cutoff structure.

6 passes identiques de 26 m de largeur, séparées par des piles de 7 m et de 28 m de longueur.

Ce barrage est fondé sur un banc rocheux dit « Pierres de Charmes », constitué par un marno-calcaire assez tendre faisant saillie sur le profil en long général du lit.

La situation des lieux est la suivante :

Les 4 passes de rive droite sont terminées et en service, mais la pile culée de rive gauche n'est pas construite.

En fait, la longueur totale du batardeau amont est de 110 m; les 40 premiers mètres qui ont été construits au préalable pratiquement en eau morte ne sont pas comptés dans la coupure.

Le niveau du lit non affouillable est en moyenne à 1,50 m en dessous du niveau du seuil des vannes.

Comme précédemment, les essais de cette coupure, qui furent confiés au Laboratoire National de Chatou, sont résumés ci-dessous par MM. CHAUVIN et RAMETTE.

Essais sur modèle :

Les essais ont été effectués sur modèle au 1/100^e, les alluvions étant représentées par un mélange de sable et de ponce. On a supposé que le massif de coupure avait une largeur en crête de 8 m. Différents cas ont été considérés :

a) $Q = 2\,000\text{ m}^3/\text{s}$:

En déversant $200\text{ m}^3/\text{h}$ de graviers sans enrochements, il s'avère impossible de réaliser la coupure. La progression de la digue s'arrête après 15 m d'avancement (fig. 7).

Même si le rythme de déversement est porté à $300\text{ m}^3/\text{h}$, il est indispensable, après 15 m d'avancement d'ajouter au matériau tout-venant une certaine quantité de matériau de carrière (25 à 50 % en fin de coupure).

b) DÉBIT VARIABLE :

Différents essais ont été effectués avec un débit variable de $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ à $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ ou à $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$. Les matériaux sont déversés au rythme de $200\text{ m}^3/\text{h}$, mais, pour maintenir la vitesse de progression de la digue, ils comprennent 50 % des matériaux de carrière après 15 m d'avancement.

La coupure s'effectue en 100 h avec $20\,000\text{ m}^3$ de matériaux; ces chiffres sont portés à 107 h et $21\,000\text{ m}^3$ dans le cas de la crue variant de $2\,000$ à $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$.

c) INFLUENCE DE DÉRASEMENTS EN RIVE DROITE :

La présence de vestiges de la berge rive droite en aval des quatre passes en service paraissait susceptible de gêner la coupure; il pouvait être intéressant de la déraser plus ou moins.

Des essais comparatifs ont été effectués avec différents dérasements en maintenant le débit à $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ et en adoptant le rythme de $200\text{ m}^3/\text{h}$ de déversement avec adjonction de 50 % de matériaux de carrière après 20 m d'avancement.

Avec la berge en place, il faut utiliser $17\,500\text{ m}^3$ de matériaux pour assurer la coupure en 70 h.

Si la berge rive droite est dérasée ($22\,000\text{ m}^3$), il ne faut que $13\,500\text{ m}^3$ de matériaux et la coupure s'effectue en 60 h environ.

Les essais mettaient donc en évidence l'intérêt de ce dérasement, qui était en grande partie nécessaire par ailleurs.

La berge étant dérasée et en supposant le débit du Rhône croissant de $2\,000$ à $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ en fin

de coupure, le massif de coupure est achevé après 80 h avec un volume global de matériau de 16 000 m³ dont 6 000 m³ environ de tout-venant de carrière (20 à 70 kg).

Exécution de la coupure :

Compte tenu des résultats d'essais et de l'expérience tirée des coupures précédentes, il fut arrêté, sur la proposition de l'entreprise rémunérée pour cet ouvrage par un forfait, le débit du Rhône devant rester inférieur à 3 000 m³/s, de construire ce massif de coupure suivant le profil définitif du batardeau et d'avoir au sommet du massif une piste de circulation de 20 m de large (au lieu de 10 à Rochemaure), qui permettait d'utiliser le gros matériel de terrassement disponible sur le chantier. C'est ainsi que furent utilisés :

— 4 scrapers de 12 m³ chacun de capacité utile; 6 camions de 6 m³ de capacité; 5 bulldozers (dont 3 super D 8 et 2 D 9); 1 dragline à godet de 2 m³ et 2 chargeuses de 3 m³ (fig. 8).

Le stockage préparé était — pour les alluvions que les scrapers prenaient en place — pratiquement illimité : 20 000 m³ de déchets de carrière et 5 000 m³ de matériaux tout-venant de carrière.

Le démarrage de la coupure était prévu pour le 16 août 1963, mais les prévisions météorologiques étant très mauvaises, on attendit des informations complémentaires. Le 17, on pouvait espérer finir la coupure avec des débits du Rhône inférieurs à 3 000 m³/s car, à partir du 23, la météo laissait entrevoir des pluies généralisées. Aussi, malgré ces conditions peu encourageantes, on donna l'ordre de démarrer le 17 à 14 h. Le débit du Rhône était alors de 2 000 m³/s. Il monta dans la nuit à 2 700 m³/s, puis se maintint pendant toute la durée de la coupure entre 2 300 et 2 800 m³/s.

Le programme des essais avait été établi avec une cadence de déversement de 200 m³/h. En fait, il fut réalisé 390 m³/h avec des moyennes de

500 m³/h sur plusieurs heures et une pointe de 600 m³/h pendant 1 h; cette cadence doublée permit de conserver la vitesse d'avancement prévue.

Lors de la mise en place des matériaux à l'extrémité du massif, on constate que ceux déversés directement dans l'eau courante sont facilement entraînés, alors que ces mêmes matériaux mis en tas et poussés en bloc dans l'eau courante sont relativement plus stables.

A entraînement égal, le rapport du poids des matériaux mis en place par ces deux modes peut atteindre 4 à 6.

Pour la granulométrie, on évita toute improvisation sur le chantier. Les quantités suivent les prévisions données par le modèle.

En doublant les volumes trouvés sur le modèle pour tenir compte de la largeur réelle de la plateforme réalisée afin que les volumes modèle et nature soient comparables, on trouve les répartitions suivantes :

	MODÈLE (m ³)	RÉALISATION (m ³)	GRANULOMÉTRIE
Alluvions.	12 000	8 700	0 à 100 mm
Déchets de carrière..	20 000	16 000	éléments de 0 à 25 kg
Matériaux de carrière..		3 800	80 % des éléments de 20 à 70 kg
Totaux.	32 000	28 500	

Après la mise à sec de l'enceinte, on fit la cubature exacte des matériaux du massif de coupure et du dépôt parallèle à la pile, et on constata la même répartition que sur le modèle : 70 % pour le massif et 30 % pour le dépôt.

La coupure fut faite en 74 h (contre 80 h sur le

8/ CHARMES. Vue d'ensemble du chantier lors de la coupure.

General view of the cutoff site with work in progress.

9/ CHARMES. Progression du massif en fonction du débit du Rhône.
Cutoff structure progression at various Rhône flows.

modèle) et la navigation fut arrêtée 4 jours. Il faut noter que deux éléments ont facilité la coupure par rapport aux essais : la forte cadence de déversement et la réduction des débits en fin de coupure. Dans la phase finale critique de la coupure, la cadence a bien été deux fois plus élevée que sur le modèle. (Voir courbes d'avancement, de débits et de cote du plan d'eau amont (fig. 9).)

En fin de coupure, alors que le débit du Rhône était de 2 600 m³/s, dont 300 m³/s évacués par la dérivation et le déchargeur, la dénivellation entre l'amont et l'aval fut, conformément aux essais, de 1,40 m environ.

Cette dénivellation augmenta assez régulièrement, de 1 m alors que le massif était à la moitié de sa longueur, jusqu'à 1,40 m en fin de coupure.

Le prix de revient de ce massif de coupure, sans le rideau de palplanches, peut être estimé (1) à 700 000 F, soit environ 25 F le m³.

Ce prix comprend la fourniture (dont 2/3 sont des matériaux de carrière), la mise en stock, la reprise et la mise en œuvre.

Conclusions

sur les coupures fluviales du Rhône

Avant de tirer des conclusions de l'expérience acquise lors des coupures du Rhône, je voudrais donner les raisons du choix que j'ai fait dans ce qui précède.

Tout d'abord, je pense que les coupures peuvent être classées en trois grandes catégories :

a) Les coupures instantanées par bloc basculé au travers du fleuve et qui se rapprochent le plus des coupures naturelles.

A ma connaissance, une telle coupure a été réalisée avec plein succès sur la Saguenay; la passe à couper avait 33 m de large, 7 m de profondeur et la vitesse du courant était de 6 m/s. Le bloc de béton construit sur berge et basculé pesait 11 000 t.

(1) Le forfait qui rémunère l'entreprise comprend la construction et l'enlèvement du batardeau amont, qui a 15 m de haut, 100 m de long (alors que le massif de coupure n'a que 10 m de haut et 70 m de long) et qui est étanché par un rideau de palplanches de 1 500 m². Cet ensemble revient à la Compagnie à 1 800 000 F actuels.

b) Les coupures que l'on peut qualifier de mécaniques et qui se présentent couramment sous deux formes :

- la coupure par rideau de palplanches, dont le principal écueil est l'affouillement du lit, les palplanches ne pouvant être battues que dans un terrain meuble. C'est le cas de Seysel précédemment décrit;
- la coupure par fermeture d'écrans, qui fut réalisée notamment en Hollande. Le principe étant la construction d'un barrage à claire-voies, chacune d'elles étant obturée très rapidement au moment opportun en abaissant des écrans métalliques.

c) La coupure par déversement de matériaux, constituant une digue, laquelle peut se faire :

- soit par tranches horizontales, cas de Génissiat sur le Rhône;
- soit à l'avancement à partir des berges, c'est-à-dire en fait par tranches verticales. C'est le cas des coupures exécutées par la Compagnie aux barrages de Donzère, Rochemaure, Le Pouzin et Charmes dont les coupures finales de Rochemaure et de Charmes ont été décrites précédemment.

Naturellement, il y a souvent possibilité de combiner les coupures types, l'essentiel étant d'arriver au résultat escompté au moindre prix.

Pour cela, je pense qu'il faut tirer parti au maximum de la situation des lieux. C'est ainsi que, sur le Rhône, pour toutes les coupures réalisées, on aurait parfaitement pu, techniquement, réaliser une coupure par la méthode d'Isbash, par digues construites à l'avancement et même dans la majorité des cas avec un rideau de palplanches.

Il faut également tenir compte des moyens dont dispose l'entreprise sur place, car pour un travail qui ne dure que quelques heures, on ne peut monter spécialement un matériel tel qu'un grand dragline, matériel qui, cependant, rend de grands services.

C'est ainsi que la coupure faite au barrage du Pouzin, que je n'ai pas décrite, a été exécutée en 16 heures. Le débit du Rhône était assez faible : 1 100 m³/s, mais l'entreprise a utilisé un dragline Bucyrus 7 W de 45 m de flèche et 7 m³ de godet. La digue de coupure a pu être construite à raison de 500 m³/h en n'employant que 8 000 m³ de matériaux, soit 20 % de moins que prévu au modèle construit à la cadence de 200 m³/h. (Cette différence de 2 000 m³ correspond à la différence des matériaux entraînés lors de la construction à cadences de 500 et 200 m³/h.)

En définitive, j'ai choisi, parmi les nombreuses coupures exécutées sur le Bas-Rhône, celle de Rochemaure, qui a présenté des difficultés par suite d'une brusque augmentation du débit en cours d'opération et celle de Charmes qui, malgré les débits élevés, montre que l'on peut suivre scrupuleusement les résultats d'essais sur modèles réduits.

Etude d'une coupure :

Je pense que, pour toutes les coupures de débits ayant quelque importance et conduisant à des dénivellations finales supérieures à 0,50 m, l'étude sur modèles réduits est souhaitable. En général, le choix du mode de coupure peut être fait sans hésitation, compte tenu des lieux et de la nature, des

matériaux utilisables économiquement. Dans le cas contraire, le problème peut être dégrossi sur modèles. Mais, dans ce cas, si l'on doit construire des modèles spéciaux, le prix des essais peut majorer de façon inacceptable le prix de la coupure.

Réalisation :

L'étude étant terminée il faut s'organiser pour éviter toute improvisation sauf cas de force majeure, et au contraire prendre des dispositions pour tirer au maximum parti du résultat des essais. La plupart du temps, les débits ne sont prévisibles que dans une large fourchette (1) et dans le cas de stockage de matériaux ou d'approvisionnement de matériel, il faut voir large en s'arrangeant toutefois pour que les excédents ne soient pas perdus (2).

Enfin, dans l'étude et la réalisation, bien tenir compte du rôle que devra jouer postérieurement le massif de coupure qui, par exemple :

- peut être inclus dans un ouvrage définitif ou, au contraire, être obligatoirement enlevé en fin de travaux;
- peut être nécessaire comme écran étanche ou, au contraire, rester perméable.

C'est ainsi que, sur le Rhône, le massif de coupure amont de Génissiat devait être étanche mais pouvait rester en place — le massif de coupure aval devait être étanche, mais devait être enlevé.

A Seyssel, les 20 m inférieurs du rideau de coupure faisaient partie de l'ouvrage définitif, mais les 10 m supérieurs étaient recépés.

Tous les massifs de coupure du Bas-Rhône exécutés par la Compagnie devaient être étanches et pouvoir être enlevés dans des conditions économiques.

Une des questions qui se pose le plus rapidement, et dont peut-être dépendra le mode de coupure, est le choix de la granulométrie, compte tenu du prix de revient, car les massifs de coupure sont d'autant plus importants que la granulométrie des matériaux employés est plus fine. En général, il est raisonnable de ne pas employer des matériaux dont le diamètre moyen soit inférieur au double de celui constituant le fond affouillable.

Comme nous l'avons vu, l'empattement des massifs de coupure est important aussi, il y a souvent intérêt à le réduire par différents artifices.

C'est ainsi qu'à Génissiat des tétraèdres métalliques retenus par des câbles avaient permis de raidir la pente aval du talus du massif de 4 à 14 %. Un artifice analogue a été employé dans la coupure de la Colombia où il fut utilisé 2 000 tétraèdres en béton de 12 t chacun (soit au total 10 000 m³ de béton).

Cet artifice, onéreux certes, réduisit l'épaisseur du massif de moitié. Malgré cela, la construction en fut très longue, puisqu'elle dura 60 jours.

La largeur de la passe à couper était de 72 m,

(1) C'est ainsi qu'en août 1963 (mois de la coupure de Charmes), le débit du Rhône, qui était, au début du mois de 1 100 m³/s, passa à 2 800 m³/s, puis revint à 1 200 m³/s pour monter à nouveau à 2 800 m³/s et tomba en fin de mois à 1 600 m³/s.

(2) Pour toutes les coupures faites sur le Bas-Rhône, nous avons toujours stocké non seulement les matériaux nécessaires à la coupure, mais ceux nécessaires à tout le batardeau amont et même au batardeau aval de l'enceinte à réaliser en définitive, soit en moyenne un fois et demi à deux fois les matériaux strictement nécessaires à la coupure.

la profondeur 18 m, la dénivellation entre les plans d'eau amont et aval de 5 m, pour un débit variant entre 3 000 et 4 000 m³/s.

Enfin, en se basant sur le fait que la force d'entraînement nécessaire est plus grande pour des matériaux au repos que pour des matériaux en mouvement, on peut réduire la grosseur des matériaux en réglant l'avancement par bonds successifs de deux massifs de coupure, menés parallèlement, qui partagent la dénivellation totale en deux nivelées de moindre importance, fonction de l'avancement de chacun des massifs.

C'est cette méthode qui fut appliquée à Albany Falls où l'on put ainsi réduire le poids unitaire des blocs de 10 à 2 t.

Sur le plan pratique, le contrôle permanent des dénivellations entre l'amont et l'aval des massifs permet d'intervenir judicieusement.

Enfin, pour un même type de coupure, le procédé de construction et les caractéristiques des matériaux employés peuvent modifier assez profondément les phases observées au cours de l'élaboration du massif.

a) CAS DES MASSIFS EXÉCUTÉS PAR TRANCHES HORIZONTALES :

Dans ce cas, les matériaux peuvent être, comme à Génissiat, jetés dans l'eau suivant une ligne perpendiculaire au fleuve, le courant les véhiculant jusqu'à leur emplacement définitif, et nous avons les quatre configurations présentées précédemment; au contraire, les matériaux peuvent être mis en place au moyen d'engins, système appliqué à Fort-Randall dans la coupure du Missouri. Dans ce cas, la configuration est tout autre (fig. 10). L'engin de mise en place était constitué par une drague suceuse-refouleuse de 1 000 m³/h, pouvant mettre en place des matériaux atteignant 35 cm de diamètre.

La drague exécuta d'abord le socle du massif sur toute sa surface (longueur : 120 m, largeur : 100 m, hauteur : 1,50 m). Le débit de la passe à couper, qui était à l'origine de 850 m³/s, se trouva, après exécution de ce socle, réduit à 150 m³/s, le solde du débit passant par la dérivation. Puis, remblaiement de la moitié aval du massif, toujours par tranches horizontales, sur une hauteur voisine de 1,50 m, le débit déversant se trouvant ainsi réduit à 50 m³/s. Enfin, poursuite du massif par tranches verticales dans la moitié amont, ceci pour commodité de mise en place, la manœuvre du ponton portant la conduite de 800 mm déversant les matériaux étant délicate.

b) CAS DES MASSIFS EXÉCUTÉS A L'AVANCEMENT :

Les massifs de coupure exécutés sur le Bas-Rhône furent tous étudiés sur modèles à Chatou. En principe, ils sont constitués par des digues construites à l'avancement à partir de la berge ou d'une pile, sauf pour une coupure de Donzère, où l'on appliqua une méthode mixte (palplanches, massif en matériaux de carrière).

Pour tous ces massifs, notre intérêt était d'employer au maximum des alluvions dont le prix est 5 à 10 fois inférieur aux produits de carrière; les études ont donc été conduites pour réduire l'emploi de produits de carrière. Toutefois, on est très vite limité dans ce domaine, car la progression du massif se fait de la façon suivante :

L'avancement de la digue s'effectue sans diffi-

10/ COUPURE DU MISSOURI. Profil en travers du massif de coupure de Fort Randall.

*Cross-sectional view
of the Fort Randall cutoff.*

culté jusqu'à ce que son pied se rapproche du mur ou de la berge constituant la limite des passes à fermer. Le talus d'avancement de la digue étant voisin de $3/2$ jusqu'à ce point, la vitesse de l'eau n'est en général pas suffisante pour entraîner une partie notable des matériaux; au-delà le phénomène change complètement; le contrôle de l'opération devient un contrôle par frottement tout à fait conforme à la théorie de Straub. (Notons à ce sujet que les études de Straub sur la force critique d'entraînement se raccordent à celles d'Isbash sur les barrages construits en pierres lancées.)

Il tend alors à se constituer un chenal limité, d'une part, par la rive opposée, d'autre part, par une digue parallèle à la rive qui se forme automatiquement par entraînement des matériaux. La longueur de cette digue est fonction de la rugosité, la dénivellation devant correspondre à la perte de charge par rugosité dans ce chenal. En conséquence, plus la granulométrie des matériaux est forte, moins la digue parallèle sera longue.

Dans le cas de nos coupures sur le Bas-Rhône, où la rive opposée est limitée par la pile dont la longueur totale utile, cellules aval comprises, est de 50 m, la granulométrie doit être telle que la longueur du chenal ne dépasse pas 50 m. Dans le cas contraire, on aboutit à une coupure impossible (cas visé dans la description des études sur modèle (fig. 7).

Ce chenal étant ainsi formé, on peut le couper soit en déversant des matériaux de même granulométrie — le chenal se rétrécit alors de plus en plus jusqu'à la fermeture complète par l'amont — soit au contraire en accélérant la fermeture en immergeant des obstacles. Ce dernier procédé fut employé à la fermeture du chenal de la passe 4-5 de Donzère-Mondragon limité, d'une part, par un rideau de palplanches, d'autre part, par la digue en matériaux de carrière. L'accès à cette digue étant difficile, l'entreprise eut l'idée, pour limiter la quantité de produits de carrière, d'immerger dans le chenal des gabions retenus à l'amont par des câbles. On ferma ainsi rapidement un chenal de 15 m de long, 12 m de large au plan d'eau, la dénivellée totale étant voisine de 1,20 m.

Dans ce qui précède, je n'ai cité que des cas où la digue parallèle à la rive opposée, qui se formait dans la dernière phase de la coupure, était constituée par des matériaux déversés à l'amont et charriés par le courant.

Si la situation des lieux s'y prête, on peut très bien envisager la construction directe de cette digue parallèle, ce qui permettrait sûrement, en prenant quelques précautions lors de la mise en place, de réduire la granulométrie des matériaux. C'est cette méthode qui fut employée pour la coupure du Missouri au droit du barrage d'Oahe (un des plus grands barrages en terre du monde).

La situation était la suivante :

Pour qu'un débit appréciable fût dérivé dans les 6 souterrains de dérivation, il fallait une surélévation du plan d'eau amont de 3 m, le débit du Missouri étant de $800 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour obtenir ces conditions, les essais avaient montré, avec les matériaux dont on disposait (schist dont la granulométrie s'étalait de 0 à 40 cm) qu'il fallait réduire le lit à 27 m de large sur une longueur de 185 m. Le lit du Missouri avait en ce point, avant tous travaux, une largeur de 760 m. La construction de cette gigantesque digue de coupure fut faite à la cadence de $3\,500 \text{ m}^3/\text{h}$. Le cahier des charges imposait un minimum de $2\,000 \text{ m}^3/\text{h}$. Le cube total à mettre en place était voisin de 1 M m^3 .

La coupure du chenal de 27 m nécessita $60\,000 \text{ m}^3$ de matériaux. Malgré une brusque augmentation du débit de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ au moment de la fermeture du chenal, la coupure s'exécuta dans de bonnes conditions.

Enfin, tout au long de cet exposé, je n'ai parlé que des coupures longuement préparées et en général étudiées sur modèle; je terminerai par une coupure sur le Rhône, qui est en fait la réparation d'une brèche, exécutée par le Service de la Navigation en 1959.

À Avignon, le Rhône se divise en deux bras, dont le bras de rive droite dit « de Villeneuve » est fermé par un massif en enrochements déversant et perméable. Le but de ce barrage est de maintenir la totalité des débits en basses eaux dans le bras de rive gauche pour assurer un tirant d'eau convenable à la navigation, la perméabilité du massif assurant le petit débit nécessaire à la salubrité.

Alors que le seuil de ce barrage déversant était en réparation, une crue subite des affluents cévenols, estimée à $4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, fit une brèche de 55 m de large dans ce barrage. La crue passée, la réparation s'imposa immédiatement, les basses eaux d'automne risquant d'arrêter la navigation. La coupure fut alors immédiatement étudiée par calcul (méthode de Straub) et en se servant des études qui avaient été faites pour l'El Chocon en Argentine dont les travaux ne furent pas exécutés. Les travaux, qui durèrent 70 jours, furent terminés le 11 décembre 1959.

Cette coupure fut conduite à petite cadence : 300 à $1\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$. Elle nécessita $73\,000 \text{ m}^3$ d'enrochements et de moellons, $3\,000 \text{ m}^3$ de gabions et $5\,700 \text{ m}^3$ de gros blocs. La dénivellée était en fin de coupure de 1,20 m.

Enfin, pour conclure, je crois que tout ce qui précède peut nous permettre d'affirmer qu'une coupure fluviale est toujours une opération délicate et qu'il est souhaitable, dans toute la mesure du possible, de l'étudier minutieusement et de l'exécuter le plus rapidement possible, les sacrifices pécuniaires faits pour accroître la rapidité étant liés à l'incertitude de la prévision des débits.

ABSTRACT : Damming the Rhone, by M. Bayard *

The "Compagnie Nationale du Rhône" has dammed the river at nine points during the last twenty-five years. Four of these cases are described, also a few ways of cutting costs and limiting failures.

Damming methods can be considered to fall within the three following main groups:—

a) "Instantaneous" damming (similar to natural damming) by the toppling of a block into the river, as in the Saguenay River scheme.

b) "Mechanical" damming by closing the openings in a structure with sheet piling or metal screens. This method is mainly used in marine projects.

c) "Dumped rubble" damming in which the material is either dumped in successive horizontal layers, or forming dykes gradually extending further out into the river.

Description of four cases of damming on the Rhône.

a) GÉNISSAT (April 1939). — In order to build the Génissiat dam, it was necessary to divert the Rhône's average flow of 400 cu.m/sec. into two tunnels, which required raising the water level for a flood flow of 1,300 cu.m/sec by 7 metres. As the river ran through a comparatively inaccessible gorge at this point, it was decided to build the diversion structure up gradually in horizontal layers of rock fill, assuming a maximum permissible overflow of 9 cu.m/sec per metre length of structure, i.e. a total overflow of 300 cu.m/sec. Tests by SOGREAH showed that it was necessary to build two structures and to steepen the face of the downstream one with metal tetrahedrons in order to reduce its volume. The damming operation was completed in a month; requirements for both structures included 40,000 cu.m of rock fill up to 400 kgs in weight and 500 metal tetrahedrons weighing 130 kgs each and held in position by cables.

b) SEYSEL (Compensation reservoir for Génissiat, December 1949). — This closure was made between the piers of the third sluiceway in the dam, covering an overall width of 43 metres. The Seyssel dam stands on an 18 metres deep alluvium layer, with a substantial metal gate hoist bridge running above the considered sluice. The upstream side of the dam apron is protected by sheet piling taken down to bedrock level.

In view of these particular conditions, it was finally decided after model tests at the "Compagnie Nationale du Rhône" laboratory at Lyons to use the upstream cut off curtain to close the gap.

As the difference between upstream and downstream water levels after closure was 2 metres, and the river bed was 8.50 metres below the sluice floor levels, the following were necessary: (i) To support the sheet piling on a horizontal beam, itself supported by the main sluiceway piers and a small intermediate one. — (ii) To sink two layers of gabions 56 cu.m in volume in order to reduce scour. — (iii) To make elaborate guiding arrangements when ramming sheet piling in.

Larsen VI sheet piling reinforced over a quarter of its length was used for this work. The closure took only one month to complete, in spite of a 700 cu.m/sec. flood.

c) ROCHEMAURE (June 1957). — This dam half-way between Lyons and the sea features six sluiceways 26 metres in width. At the time of closure, four of these had been completed, also the left-bank abutment pier. It was proposed to close a 56-metre gap featuring a bed of loose material by gradually filling out into the river. Tests were initially carried out at the "Laboratoire National" at Chatou with a flow of 2,000 cu.m/sec., but as one of 2,400 cu.m/sec was experienced in the meantime, it was decided to repeat them with conditions as they were when the working procedure improvised during the flood flow was being applied at the site. The model results were found to agree perfectly with the actual site conditions.

The closure was completed in 90 hours; it required 16,000 cu.m of material, including 20 % quarry run up to 70 kgs in weight and 5 % rock fill weighing up to 400 kgs for the final stage. The difference between upstream and downstream water levels on completion of the work was 1 metre.

d) CHARMES (August 1963). — This site resembled Rochemaure, except that the river had a firm bed and a steeper gradient. The gap to be closed was 70 metres wide, resulting in a level difference of 1.4 metres after closure. The operation was carried out at flows varying between 2,300 cu.m/sec and 2,800 cu.m/sec. From tests carried out at the "Laboratoire National" at Chatou, it was anticipated that 32,000 cu.m material would require placing in 80 hours, but it eventually turned out that only 28,500 cu.m were in fact required, taking 74 hours to place, including 3,800 cu.m of material in the 20 kg-70 kg range. Material sizes were as predicted by the model, also the proportions in the damming structure and the bank parallel along the pier, i.e. 70 % and 30 % respectively.

Conclusions : WAYS OF REDUCING COSTS AND LIMITING FAILURES :

Model tests appear to be an essential requirement for flows of any size and where final differences between upstream and downstream water levels exceed 0.5 m.

The damming method used will depend on site conditions and the type and cost of the material obtainable near the site, also the type of site equipment available. The ultimate purpose of the structure must be considered, and whether or not it is to remain as a permanent feature of the dam.

All these were considered to be decisive cost-reducing factors in the Rhône and many other projects as well. At Fort Randall on the Missouri for instance, the availability of a 1,000 cu.m/hour capacity suction dredger enabled the material in the closure to be built up in successive horizontal layers; at Génissiat, on the other hand, the material was dumped from a bridge, which was the only way making use of the railway facilities available on the site.

A number of different and sometimes inexpensive procedures can be used to reduce the cost of a flow-damming structure, or of other project works, such as the following for instance: (i) The use of metal tetrahedrons, as at Génissiat, or of concrete tetrahedrons such as the 12-ton units used in the Columbia river, so as to reduce the volume and coverage of the damming structure. (ii) The practice of "pushing" the material into the water in batches of 10 cu.m or 20 cu.m at a time, as was done in the Lower Rhône, for which purpose smaller-sized materials can be used than were simply dumped into position; alternatively, two structures can be built at the same time as at Albany Falls for instance, where this procedure enabled stone weights to be reduced from 10 tons to 2 tons.

The same results can be achieved by the method used for the Oahe dam on the Missouri, which involved the direct placing of a structure of the same thickness as the length of the "bund" forming along the river bank due to material dumped from the end of the closing dyke.

In conclusion, therefore, the damming of a river can certainly be considered to be a delicate operation requiring much careful thought, and it should always be carried out as rapidly as possible.

* Director of Works and Project Operation at the Compagnie Nationale du Rhône, in collaboration with MM. CHAUVIN and RAMETTE, Engineers at the Centre de Recherches et d'Essais de Chatou.