NOTE SUR L'ÉTUDE DES COUPURES DES BOUCLES DE L'ISÈRE EN AMONT DE GRENOBLE

PROPOSED CUT-OFFS OF THE MEANDERS IN THE ISERE RIVER

Essais sur modèles réduits

English Synopsis p. 335

par M. JONTE

Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées

I. — EXPOSE PRELIMINAIRE SOMMAIRE

Le cours de l'Isère a subi dans le Grésivaudan, à l'amont et à l'aval de Grenoble, d'importants exhaussements depuis les travaux d'endiguement effectués vers 1860. Il en est résulté un relèvement du niveau des embouchures des canaux d'assainissement et une ascension progressive de la nappe phréatique, qui tendent à transformer en marécages de grandes étendues de terres cultivées ; en outre, les digues présentant en de nombreux endroits une hauteur et une résistance insuffisantes, compte tenu de l'exhaussement des fonds, sont parfois submergées et emportées par les crues exceptionnelles de la rivière, ce qui provoque d'importantes inondations très nuisibles aux cultures jadis florissantes de la vallée.

De grands travaux d'assainissement se sont donc révélés nécessaires devant avoir pour but :

- de sauvegarder environ 11.500 ha. de terrains dont la valeur décroît de façon lente, mais continue.
- d'éviter des inondations catastrophiques, en particulier pour la ville de Grenoble et la submersion de certaines voies importantes de communication de la vallée.

A la suite d'un concours ouvert en 1926 par une commission interministérielle pour rechercher les remèdes à apporter à cette situation, un avant-projet présenté par les Etablissements Schneider fut retenu et le programme des réalisations fut approuvé dans ses grandes lignes par l'Administration Supérieure. Ce programme d'en-

Plan I. — Profil en long de la rivière entre Brignoud et Grenoble.

semble fit l'objet de la loi du 27 juillet 1930 actuellement abrogée et remplacée par celle du 30 novembre 1941, qui définit outre le montant d'engagements des dépenses, les participations financières des diverses collectivités intéressées par l'exécution des travaux.

Pour la partie de l'Isère, d'environ 40 kms de longueur, située à l'amont de Grenoble, et comprise entre cette ville et la limite du département de la Savoie, le programme de travaux prévoit la coupure de 3 boucles dites des Sablons, de la Taillat et de Bois Français. Dans cette portion du cours de l'Isère, la sédimentation est en effet très importante par suite de l'insuffisance de la pente du lit ($0.655 \text{ } \frac{\text{m}}{\text{m}}$ seulement entre l'amont de la boucle du Bois Français et l'aval de la boucle des Sablons) et d'importants atterrissements ont pu être constatés depuis 1860. Ils sont de l'ordre de :

0 m. 80 au pont de Domène entre les boucles de Bois Français et de la Taillat ;

1 m. 60 au pont de La Batie à l'amont immédiat de la boucle de Bois Français.

A l'amont de la section des boucles les atterrissements sont de moins grande amplitude :

1 m. 20 environ au pont de Brignoud situé à 6 kms en amont de celui de La Batie ;

1 m. environ au pont de Tencin situé à 8 kms en amont de celui de Brignoud.

Ils sont enfin peu sensibles à la limite Isère-Savoie.

La sédimentation est due principalement à l'importance du débit solide de l'Isère, au débouché de la Savoie ; débit qui serait annuellement de l'ordre de 160.000 m^3 à 200.000 m^3 autant qu'on puisse en donner une estimation approchée. Il semble par ailleurs que 40.000 m^3 environ de gravier se déposent annuellement dans le secteur des boucles par suite du pouvoir d'entraînement insuffisant de l'Isère.

La coupure des 3 boucles précitées entraînerait un raccourcissement important du lit de la rivière, comme l'indique le tableau suivant :

	Longueur des boucles	Longueur des coupures prévues	Raccour- cissement
Bois Français ..	2.650 m.	850 m.	1.800 m.
Le Taillat	3.100 m.	600 m.	2.500 m.
Les Sablons ...	2.550 m.	850 m.	1.700 m.
Totaux	8.300 m.	2.300 m.	6.000 m.

Du fait de ce raccourcissement la pente passerait de 0.655 mm/m . à 0.856 mm/m . dans le

Plan II. — Emplacements des coupures et des prises de pression du modèle.

secteur des boucles d'où augmentation considérable du pouvoir d'entraînement de la rivière (1) suppression de la sédimentation dans ce secteur, et création d'une érosion régressive approfondissant le lit sur une grande longueur en amont de la région des coupures.

Toutefois, la mise en mouvement par érosion d'un cube considérable de graviers estimé à environ 2.400.000 m³ provenant d'une part de la coupure des boucles, d'autre part, de l'érosion régressive du lit à l'amont des coupures n'est pas sans présenter un grave danger pour les parties aval de la rivière ainsi aménagée, en particulier pour la traversée de la ville de Grenoble dont les fonds sont restés stables depuis 1860. Il s'agit de savoir si un tel cube est susceptible d'être progressivement entraîné par la rivière sans provoquer des exhaussements qui s'avèreraient extrêmement gênants, et même dangereux. De toute façon, la masse de graviers ne devrait être mise en mouvement que par quantités annuelles très limitées et il serait nécessaire d'en répartir le déplacement sur plusieurs dizaines d'années.

Le projet prévoit à cet effet l'établissement en tête de chaque coupure, d'un barrage de garde à poutrelles horizontales superposées permettant d'une part de contrôler la répartition des eaux de la rivière entre la boucle et la coupure, d'autre part, de fixer le fond de gravier à une cote déterminée au-dessus du radier du barrage, le niveau de ce radier correspondant au profil en long définitif escompté pour le lit. Les poutrelles de fixation du lit seront progressivement enlevées pour permettre à l'érosion régressive de se manifester à l'amont de la coupure. Les barrages de garde permettront donc théoriquement de rester maître des phénomènes, condition indispensable pour assurer la sécurité des opérations.

Nous ne pouvons entrer ici dans le détail du projet et dans les calculs ayant permis de déterminer la ligne probable des fonds escomptés une fois terminée l'érosion régressive.

D'après ces calculs on serait en droit de s'attendre à des creusements du lit d'environ :

2 m. 20 au pont de La Batie.

1 m. 20 au pont de Domène.

0. m. 90 au pont de Brignoud.

creusements qui rétabliraient sensiblement les fonds de 1860 et conduiraient ipso facto à l'as-

sainissement général de la vallée par un abaissement du même ordre de la nappe phréatique et à sa protection contre les crues par suite de l'abaissement corrélatif du niveau des hautes eaux.

Nous ne pouvons non plus indiquer ici les modalités spéciales d'aménagement du lit à l'aval du confluent de l'Isère et du Drac pour permettre l'acheminement du gravier, soit jusqu'à des souilles de dragage entretenues, soit jusqu'à St-Gervais (point où le resserrement de la vallée et l'augmentation de la pente du lit donnent à la rivière un pouvoir d'entraînement largement suffisant pour transiter le surcroît de débit solide en provenance de l'amont de Grenoble) modalités qui font à l'heure actuelle l'objet d'une nouvelle étude en conjugaison avec l'aménagement hydroélectrique de la rivière.

L'objet de la présente note est en effet plus particulièrement la description des essais faits sur modèles réduits au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique de Neyrpic à Grenoble, pour l'étude de la coupure des boucles.

II. — OPPORTUNITÉ DE FAIRE UNE TELLE ÉTUDE SUR MODÈLES RÉDUITS.

Les problèmes posés par la coupure des boucles de l'Isère sont devenus de nature particulièrement délicate et complexe. La prévision de l'évolution des fonds par la théorie pure est sujette à caution, car on sait que les lois dites de transport solide reliant les pentes aux débits liquides et aux débits solides sont très nombreuses et par suite non générales. Chaque expérimentateur a donné des formules déduites, la plupart du temps, d'essais en laboratoire, mais qui ne s'appliquent que dans une gamme limitée de variations des paramètres et ne sont valables que pour un matériau de fonds bien déterminé au point de vue grosseur, densité et granulométrie. Ces formules ne sont en outre valables que dans le cas du régime uniforme. Elles négligent systématiquement une foule d'autres paramètres (forme du lit en particulier, des ondes de crues, etc...) qu'on ne saurait négliger à priori, et qui ont certainement une importance considérable dans le mécanisme du transport solide et de l'évolution des fonds. C'est pourquoi, devant l'ampleur des intérêts liés à l'exécution des travaux de coupures des boucles de l'Isère et devant les dangers que présenteraient pour la ville de Grenoble une étude insuffisante de cette question, notre service a jugé indispensable, afin de réduire au minimum les dépenses et les risques de l'opération, de faire exécuter par le Laboratoire Neyrpic à Grenoble, une série d'essais sur modèles réduits, la technique de ces essais ayant considérablement progressé ces dernières

(1) En admettant que le débit solide soit proportionnel à la puissance de 1.5 de la pente, la puissance d'entraînement serait multipliée, du fait de l'exécution des coupures, par le facteur $\frac{(0.956)}{(0.655)} 1.5 = 1.77$. Sa valeur

actuelle annuelle étant de 160.000 m³ passerait ainsi à 284.000 m³, la puissance disponible pour le creusement du lit étant dès lors égale à la différence, soit 124.000 m³.

années, et paraissant seule susceptible d'éclairer suffisamment le problème.

Le but recherché est ainsi défini :

— est-il efficace ou tout au moins opportun de procéder à la coupure des boucles de l'Isère ?

— quelle sera l'influence de ces coupures sur le lit de la rivière, tant à l'amont qu'à l'aval des coupures, et quel sera l'ordre de grandeur ainsi que la répartition dans le temps et dans l'espace des creusements du lit ainsi que des dépôts après coupure, si de tels dépôts se manifestent ?

— est-il possible, par ailleurs, de remblayer hydrauliquement les boucles abandonnées en y dirigeant une partie du débit solide de la rivière, par des manœuvres appropriées des barrages de garde ?

— est-il possible de creuser les coupures à partir d'un chenal pilote de largeur et de profondeur initialement faibles qui s'agrandiraient sous l'action du débit liquide admis dans la coupure ?

Le problème ainsi posé a été soumis au Laboratoire Neyrpic qui, après s'être documenté sur les recherches et essais qui auraient pu être faits en pareille matière, et après avoir longuement réfléchi sur la question a finalement proposé à notre service la construction de deux modèles.

1° Un modèle général à fond fixe sur lequel seraient étudiés les problèmes de lignes d'eau et de partage des débits, et qui représenterait, à des échelles à déterminer, le lit de l'Isère entre Brignoud et le confluent de l'Isère et du Drac ;

2° Des modèles particuliers de chacune des trois boucles, à fond mobile, pouvant être raccordés bout à bout en un modèle unique où seraient étudiés plus particulièrement les phénomènes d'évolution des fonds mobiles à la suite des coupures, les échelles de ces modèles pouvant être différentes de celles admises pour le modèle général à fond fixe.

III. — NECESSITE D'OPERER SUR DEUX TYPES DE MODELES.

(à fond fixe et à fonds mobiles)

On pourrait être surpris a priori par la nécessité d'étudier sur deux types de modèles, l'un à fond fixe, l'autre à fonds mobiles, les justifications ci-après présentées par le Laboratoire et que nous avons faites finalement nôtres.

1° Le problème posé par la coupure des boucles se réduit en définitive à un problème de lignes d'eau et à un problème d'entraînement des fonds ; on désire, en effet, abaisser la ligne

d'eau de l'Isère de façon à permettre l'enfoncement de la nappe phréatique et de telle sorte que la rivière en temps de crue ne déborde qu'à partir de débits plus élevés que les débits actuels de débordement. Ces problèmes de lignes d'eau sont liés à des questions d'entraînement de matériaux et la corrélation de ces deux catégories d'études est évidente ; la coupure d'une boucle s'accompagne avant toute érosion d'une modification de la ligne d'eau sous forme d'un remous d'abaissement situé en amont de la coupure ; à son tour ce remous d'abaissement est à l'origine d'une transformation du fond, car avec l'augmentation de la pente, la force d'entraînement de l'eau ira s'accroissant, l'érosion pourra dès lors s'amorcer et se propager dans tout le lit ; elle s'accompagnera d'une modification des lignes d'eau qui réagit elle-même sur le fond ; lignes d'eau et lignes de fond évoluant parallèlement vers des formes d'équilibre.

2° Les conditions de similitude et les possibilités de réglage des modèles pour la reproduction correcte des lignes de remous et pour celle des phénomènes d'entraînement ne sont pas les mêmes.

3° L'étude des lignes d'eau exige l'emploi de modèles longs et dans lesquels il faut avant tout satisfaire la similitude du mouvement varié, c'est-à-dire celle de la rugosité des parois ; on y parvient par un réglage, ce dernier serait presque impossible sur un modèle à fond mobile dont le matériau est choisi d'après d'autres considérations.

4° L'étude des problèmes d'entraînement de matériaux nécessite l'emploi de modèles relativement courts de manière à éviter les phénomènes de triage et dans lesquels il importe surtout de réaliser la similitude des efforts sur le fond. Celle-ci sera suffisante si après l'avoir réalisée en quelques sections on constate que la reproduction des lignes d'eau est approximativement correcte.

On ne pourrait d'ailleurs exiger beaucoup mieux, car sur ces modèles les caractéristiques des fonds mobiles sont imposées par les conditions de similitude d'entraînement ; les coefficients de Chezy prennent donc des valeurs qui satisfont à la similitude de l'entraînement des matériaux et non à celle des courbes de remous.

D'où nécessité de disposer de deux catégories de modèles :

— des modèles à fonds mobiles assez courts sur lesquels la similitude des lignes de remous n'est qu'approchée mais pour lesquels les phénomènes d'entraînement sont à l'échelle ;

— un modèle à fond fixe sur lequel on étudiera spécialement les lignes d'eau, vitesses d'écoulement, etc... après un réglage destiné à

assurer la similitude du régime permanent ou variable.

IV. — CONSIDERATIONS GÉNÉRALES SUR LES CONDITIONS DE SIMILITUDE ET SUR LE CHOIX DES ÉCHELLES DES MODÈLES

a) CONDITIONS DE SIMILITUDE. — Nous les rappellerons brièvement :

Cas du modèle à fond fixe :

$$v = \sqrt{\mu} \quad \text{condition de Froude}$$

$$\tau = \frac{\lambda}{\sqrt{\mu}} \quad (\text{en régime variable})$$

$$c = \sqrt{\frac{\lambda}{r}}$$

$$q = \delta \mu^{3/2}$$

NOTATIONS :

λ, μ, δ , = échelles des longueurs, hauteurs, largeurs,

c = échelle des rugosités (Chezy),

q = échelle des débits,

v = échelle des vitesses,

τ = échelle des temps,

r = échelle des rayons hydrauliques.

Cas du modèle à fond mobile :

Il faut satisfaire en outre aux conditions :

— de similitude des fonds critiques d'entraînement ;

— de similitude des débits solides.

Dans les 2 cas la valeur du nombre de Reynolds doit correspondre à un régime complètement turbulent ($Re > 7000$) sur le modèle.

b) CHOIX DES ÉCHELLES :

On a choisi $\lambda = \delta$ pour une représentation plus fidèle de l'écoulement qui n'est pas toujours parallèle en plan.

Le choix des autres échelles doit tenir compte des facilités indispensables de mesure des hauteurs, des débits et conduire à des valeurs réalisables en ce qui concerne le coefficient de Chezy.

V. — ÉCHELLES DU MODÈLE A FOND FIXE.

En définitive, le Laboratoire Neyrpic, après étude de ces diverses considérations, nous a proposé d'adopter les échelles suivantes pour l'établissement du modèle à fond fixe :

$$\text{Longueurs et largeurs : } \lambda = \delta = \frac{1}{250}$$

entre Brignoud et le Drac la rivière se déroule sur 30 kms, le modèle a donc 120 m. de long. La

largeur de la rivière (100 m.) est représentée à l'échelle par 0 m. 40.

$$\text{Hauteurs } \mu = \frac{1}{50} \quad \text{pentes} = \frac{\mu}{\lambda} = 5$$

$$\text{Temps : } \tau = \frac{\lambda}{\sqrt{\mu}} = 1/35,4$$

$$\text{Vitesses : } v = \sqrt{\mu} = 1/7,07$$

$$\text{Débits : } q = \lambda \mu^{3/2} = 1/88\,500$$

Le modèle est donc du type « distorsion simple » ; cette dernière étant égale à 5, n'a rien d'exagéré (on admet que la distorsion peut aller jusqu'à 20 sur les modèles à fond fixe, et jusqu'à 6 seulement sur les modèles à fonds mobiles).

VI. — REGLAGE DU MODÈLE A FOND FIXE. CHOIX DU TYPE DE RUGOSITÉ ARTIFICIELLE.

Ce réglage consiste à façonner la rugosité des berges et du lit du modèle de manière qu'un certain nombre de lignes d'eau observées dans la nature en même temps que le débit correspondant soient reproduites à l'échelle. Les coefficients de Chezy correspondent dès lors automatiquement en chaque point à la valeur convenable. On part d'un débit Q_1 puis on passe à un débit supérieur Q_2 en modifiant seulement la rugosité des parties des berges que Q_1 laisse hors de l'eau.

Il a fallu déterminer d'abord la valeur de C dans la nature, qui a été déduite de l'observation d'une section de rivière sur une certaine longueur. Les valeurs trouvées étaient comprises entre 37 et 46 suivant le débit (236 m³/s. à 835 m³/s.).

Sur le modèle, à l'échelle $C = \sqrt{\frac{\lambda}{r}}$, les rugosités devaient donc être de l'ordre de 20 et 30 pour les débits homologues.

Après étude de plusieurs modes de réalisation de la rugosité artificielle, les laboratoires ont arrêté finalement leur choix sur l'emploi de grillages métalliques du type métal déployé, d'une utilisation très facile, et qui a fourni des valeurs de C -modèle comprises entre 15 et 38 (métal duralinox) ce qui a permis un ajustage facile des lignes d'eau.

VII. — QUELQUES DÉTAILS SUR LE MODÈLE A FOND FIXE.

Ce modèle représente le cours de l'Isère depuis 1 km. à l'aval du pont de Brignoud jusqu'au confluent du Drac, soit sur une longueur de 30 km. Son développement est de 120 m. environ (échelle 1/250).

Sa construction fut précédée du levé par notre

Service de 300 profils en travers de l'Isère, parfaitement repérés en plan par des bornes implantées sur les digues, rattachées au N.G.F. en nivellement, et rapportées à un plan de repérage soigneusement corroyé.

La matérialisation du lit fut faite sur le modèle d'après le procédé bien connu consistant à réaliser des ossatures reproduisant les profils à l'échelle, puis à trousser entre ces ossatures par mortier de ciment modelé à la règle et à la truelle les formes exactes des fonds. Les piles et culées des ponts existants ont été reproduites ensuite à l'échelle.

Les débits sur modèle étaient commandés à l'amont par un partiteur type Neyrpic pouvant être asservi à un appareil automatique de reproduction du cycle des crues. Le niveau aval était commandé par un volet réglable.

La mesure des niveaux de la ligne d'eau se faisait au moyen de prises de pression installées aux points correspondant aux échelles limnimétriques, reliées à des pots de mesure groupés en batteries pour faciliter les mesures et coordonner les nivellements de réglage.

L'ajustement des lignes d'eau a été fait pour les débits de 120-200-300-600 m³/s (Isère), l'étiage correspondant à 80 m³/s, et les crues ordinaires à 600 m³/s.

On a constaté après ce réglage et pour tous les débits de la rivière une excellente concordance entre les hauteurs d'eau modèle nature, l'écart maximum correspondant dans la nature à environ 0 m. 05 seulement, ce qui est amplement suffisant.

Avant d'utiliser le modèle à l'étude proprement dite des coupures nous avons jugé utile de procéder à une série d'essais sur la propagation des ondes de crue de l'Isère avant coupure des boucles ; ces coupures introduisant en effet une perturbation dans la propagation des crues par suite du raccourcissement du tracé du lit (acheminement plus rapide vers Grenoble et réduction de l'atténuation).

Nous indiquons quelques résultats sur ces essais particuliers.

VIII. — ETUDE DE LA PROPAGATION DE L'ONDE DIURNE DE L'ISÈRE.

On constate sur l'Isère, en période de fonte des neiges (juin et juillet) une onde journalière dite diurne ou nivale provenant de la fonte des neiges due au fort ensoleillement sur le bassin supérieur. Cette onde à allure sinusoïdale met sensiblement 24 h. à se propager jusqu'à Grenoble où elle arrive aux environs de midi (temps solaire vrai). Son amplitude atteint au maximum et au même point 0 m. 30.

Il était intéressant de reproduire cette onde

sur le modèle à fond fixe, pour connaître sa vitesse de propagation et son amortissement.

Le dispositif expérimental a été le suivant :

1° Alimentation à l'amont.

Elle est faite au moyen d'un partiteur Neyrpic qui dirige sur le modèle, sans retard ni oscillation, une fraction du débit fonction uniquement de la position du volet de manœuvre. Le débit total envoyé au partiteur est mesuré par un déversoir taré.

La manœuvre du partiteur a été mécanisée, au moyen d'un dispositif facile à concevoir, pour reproduire la courbe des débits fixée à priori en respectant la similitude des temps et des débits.

A l'échelle des temps une journée était représentée par :

$$40 \text{ minutes } 72 \left[\tau = \frac{\lambda}{\sqrt{\mu}} = \frac{1}{35.35} \right]$$

2° Mesure des niveaux.

Elle se fait au moyen de pots de mesure établis au droit des prises de pression correspondant aux échelles limnimétriques : le diamètre de ces pots a été réduit à 0 m. 05 pour ne pas « étaler la crue » l'effet de pots de grande capacité étant comparable à un débordement dans la nature. Par ailleurs les pots ont été placés à proximité immédiate du modèle pour réduire au minimum le volume d'eau des tuyauteries et éviter ainsi les phénomènes d'inertie et de retard.

L'affleurement des pointes de mesures dans leurs pots respectifs était constaté par un écouteur téléphonique en 6v — 50 pps. La précision obtenue était de 1 à 2/10 mm. sur les mesures de niveau.

3° Résultats obtenus.

On a étudié diverses ondes.

a) Une onde de référence identique à l'une de celles enregistrées par le limnigraphe de la station de Grenoble : la loi de variation des débits à l'amont a été déduite de la courbe limnigraphique d'après la loi de correspondance hauteur-débit en cette station supposée applicable en 1^{re} approximation, en régime lentement varié.

b) Une onde amplifiée dans le rapport 4/3.

c) Une onde analogue à la précédente pour l'amplitude, mais artificiellement déformée de façon à présenter le même volume total pour la journée, tout en étant plus pointue, afin de déceler plus aisément les déformations et l'amortissement au cours de la propagation. Les résultats des mesures aux différents profils d'observation du modèle ont conduit aux conclusions suivantes :

— On n'a pas pu constater, à proprement parler, d'amortissement sensible des ondes étu-

diées ; leur amplitude s'accroît ou diminue selon la forme des sections voisines de chaque profil de mesure.

— L'amplitude paraît peu sensible à la forme plus ou moins aiguë de l'onde de crue.

— La vitesse moyenne de propagation dans la nature du maximum des ondes a été trouvée, d'après le modèle, comprise entre 1,90 et 2 m/s (base de mesure 95 m.) correspondant à 6,85 et 7,2 km/h, soit une moyenne de 7 km/h. C'est le chiffre que nous avons admis antérieurement d'après des observations horaires continues faites à diverses échelles limnimétriques de l'Isère sur différentes ondes d'amplitudes comparables à celles essayées sur le modèle. L'accord entre la réalité et les chiffres donnés par le modèle est donc très satisfaisant.

IX. — ETUDE DE LA PROPAGATION DES CRUES PROPREMENT DITES.

En plus des ondes diverses nous avons fait étudier sur le modèle les ondes de crue de forte amplitude et de longue durée, comparables aux crues de printemps ou d'automne de la rivière. Quatre crues types ont été étudiées correspondant au débit minimum de 200 m³/s et au débit maximum de 600 m³/s et s'étendant respectivement sur des durées de

- 1 jour,
- 5/3 de jour,
- 2/5 de jour,
- 5 jours,

constatées effectivement dans la nature.

Le dispositif expérimental était le même que pour l'étude des ondes diurnes.

Les résultats des essais ont été les suivants :

1° Dans la limite des crues étudiées, on n'a pas pu mettre en évidence un amortissement sensible. L'amplitude est variable avec la position de la section de mesure. Pour une même section elle est très voisine pour les 4 crues considérées.

2° La forme générale du corps de l'onde est très voisine pour les différentes crues. Seule la forme au voisinage du maximum varie sensiblement.

3° Compte tenu de la difficulté d'apprécier l'instant de passage du maximum on peut admettre en première approximation que ces crues se propagent à la même vitesse (sur modèle on a trouvé un intervalle $T = 4.83$ minutes, la base de mesure ayant 95 m. de longueur) correspondant dans la réalité à 2,32 m/s ou 8,30 km/h.

Ce chiffre est également en bon accord avec celui que nous avons admis antérieurement à

ces essais par des mesures directes de vitesse de propagation dans la nature

- (7 km/h pour un débit de 200 m³/s)
- (9 km/h pour un débit de 600 m³/s)

ainsi que par certains calculs de cette vitesse dérivant de formules connues.

X. — MODELES A FOND MOBILE. GENERALITES.

Remarques sur les conditions de similitude des modèles à fond mobile.

Les conditions **théoriques** de similitude pour un modèle fluvial à fond mobile, que nous avons brièvement énoncées au § 4, sont les suivantes :

a) Similitude dynamique de l'écoulement sous les forces de pesanteur et d'inertie (similitude Froude) ;

b) Similitude du régime de turbulence ;

c) Similitude des forces de turbulence, c'est-à-dire similitude des rugosités ;

d) Absence de dunes et zone d'utilisation des sables assez large pour pouvoir expérimenter sur le modèle à des débits correspondant aux fortes crues de la rivière ;

e) Similitude des conditions de début d'entraînement des fonds ;

f) Similitude des effets d'érosion et de dépôt.

On connaît les difficultés considérables que l'expérimentateur rencontre pour faire un compromis entre toutes ces conditions dans l'état de la technique actuelle des modèles réduits sur fonds mobiles, car il est impossible d'obtenir une similitude parfaite. Comme nous l'avons déjà indiqué plus haut, les modèles à fond mobile devront surtout respecter la similitude des phénomènes d'entraînement, d'érosion et de dépôt. Il ne faudra pas leur demander une parfaite similitude des lignes de remous qui nécessiterait des valeurs des coefficients de Chézy impossibles à obtenir avec les matériaux utilisés qui doivent, de leur côté, satisfaire à d'autres conditions impératives, en particulier à la similitude des forces de début d'entraînement.

La similitude du régime de turbulence s'obtient en général sans difficulté ; l'écoulement dans la nature étant franchement turbulent il est possible d'obtenir sur le modèle la même condition sans sujétion particulière.

La similitude des rugosités ne pourra généralement pas être obtenue car on est limité dans le

choix du matériau par d'autres considérations propres à sa mobilité et à sa zone d'utilisation (absence de dunes). On ne pourra généralement obtenir la correspondance entre débits et hauteurs que moyennant une certaine distorsion, qu'on s'efforcera de réduire au minimum.

L'échelle des hauteurs μ du modèle sera déterminée de façon à satisfaire au mieux à toutes ces conditions, l'échelle des longueurs λ étant fixée à priori.

L'échelle des temps ne pourra être pratiquement fixée que par l'observation. Même si la similitude des conditions d'entraînement est respectée, les processus des mouvements du lit ne peuvent être suivis dans des intervalles de temps homologués, car des matériaux dont le commencement d'entraînement s'effectue dans les mêmes conditions, peuvent former un lit dans des temps complètement différents. Il conviendrait donc de connaître dans la nature les relevés des fonds de la rivière à deux époques différentes ; le fond affouillable du modèle étant modelé à la forme correspondant au premier relevé, on sera amené à faire fonctionner le modèle conformément aux hauteurs d'eau et aux débits pendant le laps de temps séparant les deux relevés dans la réalité, tous les travaux qui ont été effectués en grand étant reproduits en petit aux époques correspondantes. Si le modèle est bien réglé, son fond devra se trouver à la fin de cet écoulement dans l'état correspondant au relevé le plus récent. Les divergences constatées indiqueront la précision du modèle. Ceci suppose prédéterminée l'échelle des temps. C'est plutôt en cherchant à obtenir la vérification du modèle que l'on détermine expérimentalement cette échelle (qui peut du reste varier avec le débit). En général, partant du fond initial, on fait passer un nombre de cycles de crues suffisant pour obtenir le fond final, chaque cycle de crue correspondant dans la nature à un intervalle de temps déterminé. Ceci montre que le réglage d'un modèle à fond mobile est intimement lié à la qualité, au nombre et à la précision des observations faites dans la nature sur la position des fonds et sur leur évolution au cours du temps. Les conclusions tirées des observations sur le modèle ne peuvent, du reste, être considérées que comme des extrapolations, des tendances à l'évolution et non comme des certitudes.

XI. — MODELES A FONDS MOBILES DE L'ISERE.

Nous indiquerons sommairement ci-dessous la méthode qui a été utilisée pour l'établissement des modèles à fonds mobiles de l'Isère.

On s'est fixé à priori les échelles des longueurs

λ et largeurs δ qui ont été prises égales à celles relatives au modèle à fond fixe soit

$$\lambda = \delta = 1/250$$

Les modèles de chacune des 3 boucles ont été construits indépendamment, pourvus chacun d'un dispositif d'alimentation de débit liquide et solide, de façon à pouvoir étudier séparément chacune des coupures. Les modèles ont été toutefois implantés de manière à pouvoir être ultérieurement raccordés en série et constituer ainsi un seul modèle, afin de pouvoir étudier les répercussions des coupures les unes sur les autres.

Les modalités de construction et d'implantation sont analogues à celles du modèle à fond fixe.

Toutefois les dalles horizontales supportent des canaux en béton de section rectangulaire variable, dans lesquels furent représentées au mieux, après troussage latéral, les formes des rives de l'Isère en plan pour les débits moyens de la rivière. Le lit a été ensuite garni du matériau destiné à représenter le fond mobile, sur une épaisseur suffisante pour ne pas limiter les phénomènes d'érosion de grande amplitude dus aux coupures à étudier.

a) Choix du matériau représentant les fonds — Similitude des conditions de début d'entraînement.

On sait qu'il est impossible de représenter « à l'échelle » les matériaux constitutifs du lit d'une rivière. On serait conduit à des matériaux beaucoup trop fins qui introduiraient des phénomènes de cohésion propre faussant les mobilités et qui provoqueraient en outre la formation de dunes. On est donc dans l'obligation de choisir un matériau satisfaisant seulement, en dehors de toute similitude géométrique, aux conditions de similitude des forces de début d'entraînement et autant que possible à la similitude des effets d'érosion et de dépôt, pour des débits et hauteurs d'eau homologues aux valeurs naturelles.

Débit et hauteur de début d'entraînement. —

On sait également qu'un lit de matériaux mobiles homogènes sur lequel on fait passer des débits liquides croissants ne commence à être entraîné que quand les vitesses au voisinage du fond atteignent une certaine valeur minima dite valeur critique de commencement d'entraînement. Les caractéristiques hydrauliques de la section reliant les vitesses de fonds au débit, à la hauteur et à la vitesse moyenne conduisent pour ces variables à des valeurs Q_c — H_c — V_c dites de commencement d'entraînement ou valeurs critiques. Il est particulièrement difficile dans le cas d'une granulométrie hétérogène (cas général et cas de l'Isère en particulier) de définir avec exactitude le commencement d'entraînement car tous les grains constitutifs du fond ne sont pas

d'une égale mobilité. On peut dire qu'il y a commencement d'entraînement quand tous les matériaux de surface se mettront franchement en mouvement. On admettra également, ce qui n'est pas absolument exact, que les conditions de début d'entraînement sont les mêmes que celles de fin d'entraînement, généralement plus faciles à observer de façon expérimentale par les expériences d'érosion d'un lit affouillable.

Il a été nécessaire d'abord de déterminer dans la nature les valeurs de H_c et Q_c critiques ou tout au moins des valeurs approchées, car l'expérimentation en la matière est suffisamment difficile pour que l'on ne puisse espérer obtenir mieux ; nous ne pouvons décrire ici les expériences et appareillages mis au point, à cet effet, avec la précieuse collaboration du laboratoire de la Société Hydraulique de France (nasses à gravier, détecteur électrosonore, etc...).

Dans la section intéressée par les coupures, on a admis à la suite de ces observations, comme valeurs probables des valeurs critiques de l'Isère.

$$Q_c = 300 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$H_c = 2 \text{ m. l.}$$

avec une pente de la ligne d'eau $I_c = 0.00086$.

Il s'agissait ensuite de choisir un matériau conduisant à respecter compte tenu des échelles en plan $\lambda = 1/250$ et en hauteur μ (encore indéterminée) les conditions ci-après :

1° Similitude de l'écoulement c'est-à-dire similitude Froude.

— q étant le débit sur le modèle correspondant à la fin de l'entraînement du matériau.

— i étant la pente correspondante de la ligne d'eau, on doit avoir

$$1) \quad q = Q_c \lambda \mu^{3/2}$$

$$2) \quad \frac{i}{I_c} = \frac{\mu}{\lambda}$$

2° On doit avoir en outre

$$3) \quad \mu = \frac{h}{H_c}$$

La série d'expériences faites à ce sujet chez Neyrpic relève de la méthode dite du Profil d'équilibre exposée ci-après :

Méthode dite du Profil d'équilibre. — Si dans un canal de section et de pente uniformes on fait passer un débit liquide q de valeur suffisante, le fond affouillable et la ligne d'eau se règlent au bout d'un temps déterminé et en fin d'érosion, à une pente i , et la hauteur d'eau à une valeur h .

On a 2 relations entre ces 3 quantités.

— l'une qui découle des formules liant, à tout moment, pour un matériau de fond donné (donc pour un coefficient de Chézy déterminé), la hauteur, la pente et le débit liquide

$$4) \quad \varphi(h, i, q) = 0.$$

— l'autre reliant en fin d'érosion, la pente et le débit liquide (formules de transport solide).

$$5) \quad \psi(i, q) = 0.$$

Les équations 1, 2, 3, 4, 5 donnent 5 relations entre les 4 variables.

$$q, \mu, i, h$$

On ne pourra donc en général, pour un matériau donné, les satisfaire simultanément et il faudra alors admettre une certaine « distorsion » dans une loi de correspondance. Toutefois, par un choix convenable du matériau on s'efforcera de se rapprocher le plus possible de la solution théorique, en tenant compte en outre que certaines conditions hydrauliques imposent à l'échelle des hauteurs μ de rester entre certaines limites et que la gamme des matériaux convenables est également limitée.

Les essais ont été conduits au laboratoire en faisant passer, dans un canal de tarage de 5 m. de longueur représentant une portion du cours de l'Isère et garni du matériau expérimenté, un débit constant jusqu'à cessation de l'érosion et de tout transport solide. On relevait alors, le régime uniforme étant établi, la pente de la ligne i (égale à la pente du fond) et la hauteur d'eau h (valeur moyenne déduite des relevés des profils en travers) ; ceci successivement pour différents débits d'essais. On a reporté sur un graphique (fig. 1) h et q en fonction de i . Pour la commodité de la représentation il est préférable de porter en ordonnée, les quantités proportionnelles et fonctionnelles.

$$\mu = \frac{h}{H_c} \quad \text{et} \quad \left(\frac{q}{\lambda Q_c} \right)^{2/3}$$

en fonction de $\frac{i}{I_c}$ porté en abscisses.

On voit aisément que les relations 1) et 3) précédentes sont satisfaites pour la valeur de i

fig. 1

correspondant au point F d'intersection des 2 courbes. Par contre en ce point la pente ne satisfait pas en général à l'équation 2). Pour ce faire il faut que F tombe sur la 1^{re} bissectrice OB sur laquelle 2) et 3) sont satisfaites. Au point F la loi de Froude est satisfaite, mais il y a distorsion de pente. Sur la bissectrice il n'y a pas distorsion de pente mais distorsion des débits ou si l'on veut la relation de Froude n'est pas satisfaite.

Il conviendra donc de choisir un sable tel que le point F, dit point de fonctionnement, soit le plus près possible de la bissectrice OB.

Par ailleurs les valeurs admissibles pour μ sont limitées :

inférieurement (μ_0) — Il est nécessaire d'avoir sur le modèle une hauteur d'eau h suffisante pour faire les mesures avec une précision satisfaisante. Il est nécessaire également d'obtenir un régime complètement turbulent comme dans la nature, afin de satisfaire au critérium de Reynolds ($Re > 7000$) ;

supérieurement (μ_1) — Il ne faut pas défigurer l'écoulement par une représentation infidèle des courants transversaux et par une augmentation de l'influence relative des berges sur la répartition des vitesses dans la section. Par ailleurs la distorsion de pente Δ_i est limitée (la distorsion est le rapport de la pente réelle à la pente théorique) ;

— supérieurement : car il serait impossible d'obtenir un écoulement au même nombre de Froude sans réaliser sur le modèle une rugosité considérable impossible à obtenir ;

— inférieurement : pour obtenir une bonne précision des lectures et obtenir des phénomènes d'une amplitude suffisante sur les fonds mobiles.

Sur le graphique ces conditions se traduisent par la nécessité de choisir un sable tel que le point F soit à l'intérieur d'un trapèze compris entre les valeurs limites admises pour μ et Δ_i .

Après examen de toutes ces conditions le Laboratoire Nevypic a admis que μ devait rester compris entre 1/40 et 1/63 et que la distorsion maximale pour la pente devait être comprise entre 0.5 et 1.5

$$0.5 < \frac{\lambda}{\mu} \frac{i}{l_c} < 1.5$$

Les essais du laboratoire pour le choix du sable ont porté d'abord sur le **Sable-ciment** (grains ronds de 2 mm de diamètre formés de sable fin de silice enrobé de ciment).

Le débit Q homologue du débit critique sur modèle q en similitude Froude s'est avéré trop élevé (550 m³/s) donnant une distorsion sur les débits de (Δ_q) = 1.83. Les valeurs expérimentales étaient $\mu_i = \mu_h = \frac{1}{42.3}$ avec $q = 81/s$

$i = 5.1 \text{ mm/m}$ $h = 48,5 \text{ mm}$.

L'expérience correspondait à une distorsion nulle sur la pente.

Le matériau utilisé possédait une densité trop élevée et un calibre trop faible. Plusieurs autres essais ont été faits avec d'autres grains en sablo-ciment, puis avec de la ponce, enfin avec des fines d'anthracite dont les dimensions variaient de 1/10 mm. à 1 cm. environ et d'une granulométrie bien déterminée.

On a obtenu en particulier un point correspondant aux valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} q &= 3.7 \text{ l/s } h = 33 \text{ mm} \\ \mu_h &= 1/63 \quad Q = 296 \text{ m}^3/\text{s} \quad \neq 300 \text{ m}^3/\text{s} \\ \mu_i &= \frac{1}{59} \quad i = 3.7 \text{ mm/m.} \end{aligned}$$

La pente homologue du prototype étant ainsi de

$$i = \frac{\lambda}{\mu} \frac{63}{250} \times 3.7 = 0.95.$$

supérieure de 8 % à celle de l'Isère.

Il a été nécessaire de poursuivre un certain nombre de ces essais en enlevant les éléments les plus fins du matériau et d'étudier l'influence de la granulométrie sur les pentes d'équilibre.

Les meilleurs résultats ont été finalement obtenus par un anthracite comprenant :

- 1 1/2 de grains compris entre 4 et 6 $\frac{\text{mm}}{\text{m}}$ (33 %)
- 2 de grains compris entre 2.5 et 4 $\frac{\text{mm}}{\text{m}}$ (44 %)
- 1 de grains compris entre 1 et 2 $\frac{\text{mm}}{\text{m}}$ (23 %)

fig. 2

donnant un point de fonctionnement F tombant à l'intérieur du trapèze défini plus haut.

Nous donnons sur la fig. 2 les résultats graphiques des essais de sables :

sablo-ciment ;

ponce ;

anthracite — mélange n° 1 ;

anthracite — mélange n° 2 qui a été finalement adopté.

Les laboratoires ont admis le matériau correspondant au point F A 2 pour les premiers essais ; restant entendu que ce matériau pourrait par la suite être encore amélioré, et les résultats déjà obtenus comparés avec ceux provenant de l'utilisation d'autres matériaux plus légers et plus grossiers.

b) Fonctionnement du modèle à fond mobile pour les débits différents du débit critique. — Similitude des effets de dépôt et d'érosion.

Le paragraphe précédent donnait une loi de correspondance simple pour le modèle fonctionnant aux conditions critiques. Il était nécessaire de prolonger cette loi pour toute autre nouvelle condition, en particulier pour les débits comportant un charriage intense sur le modèle.

Devant la grosse difficulté de trouver dans la nature la loi reliant le débit liquide au débit solide (les formules usuellement admises Meyer Peter, Schoklitsch, etc... n'étant pas valables pour le matériau hétérogène formant les fonds de l'Isère, comme nous l'ont montré une série d'expériences en canal, faites au Laboratoire de la S. H. F.) il était préférable de réaliser sur le modèle pour des débits et hauteurs d'eau homologues à ceux de la rivière un régime de transport solide conduisant à une évolution des fonds correspondant à l'évolution des fonds naturels.

Or le but des recherches entreprises au laboratoire est principalement axé sur l'évolution des fonds naturels qui se produira, par rapport à l'état actuel, à la suite des coupures des boucles, évolution relativement rapide, et non pas sur la reproduction du phénomène d'exhaussement progressif mais beaucoup plus lent du lit de la rivière sur certaines sections de son cours. Notre Service ne disposait pas, en outre, de documents remontant à une époque suffisamment éloignée et qui auraient permis de chiffrer avec quelques précisions les exhaussements du lit dans ces sections. Après étude de la question, il a été admis que, pour un tronçon de rivière assez long et dans un espace de temps limité (une dizaine d'années par exemple), on obtient une représentation approximative de l'évolution des fonds, en supposant que le profil du lit est en équilibre quel que soit le débit, ce dernier variant dans des conditions normales en ce qui concerne la durée et

l'amplitude des crues, qui pour l'Isère ont un cycle annuel assez régulier (l'endiguement de la rivière remonte à une centaine d'années, et il maintient à peu de choses près dans un même chenal les débits d'étiage et les débits des crues).

Il convenait donc de réaliser sur le modèle une alimentation solide réalisant cette condition de l'équilibre de la pente.

Dans l'hypothèse de l'existence d'un transport solide, les relations reliant la hauteur d'eau h , la pente i , le débit liquide q , et le débit solide g sont les suivantes :

$$4) \quad \varphi(h, i, q) = 0 \text{ (loi de rugosité) ;}$$

$$5 \text{ bis) } \psi(i, q, g) = 0 \text{ (loi de transport solide).}$$

analogues à l'équation (5) mais avec $g \neq 0$.

Il faut y adjoindre, comme précédemment, les équations exprimant la similitude :

$$1) \quad q = Q \lambda \mu^{3/2}$$

$$2) \quad \frac{i}{1} = \frac{\mu}{\lambda}$$

$$3) \quad \mu = \frac{h}{H}$$

et la relation reliant H et Q (loi débit-hauteur dans la nature, et qui est connue aisément)

$$6) \quad F(Q, H) = 0.$$

Si l'on s'impose, à une valeur donnée i , la constance de la pente sur le modèle, on pourra prendre comme variable indépendante le débit q et il y aura une courbe hauteur-débit ($h - q$) sur le modèle (équation 4), le débit solide g étant dès lors seulement fonction du débit q (équation 5 bis).

Les relations de similitude 1-2-3 permettent d'établir la relation liant Q à H dans la nature, relation qui devrait coïncider avec la loi donnée par l'équation (6) si le modèle est correct. En fait, suivant le matériau adopté, il y aura discordance plus ou moins forte entre les deux lois, mais il sera possible d'établir entre la loi hauteur-débit (modèle) et la loi hauteur-débit (nature) des coefficients de transposition suffisants pour les recherches. On pourra choisir la pente i de façon à obtenir une transposition respectant la loi de Froude en un point de la courbe débit-hauteur (point correspondant aux conditions critiques d'entraînement). On remarquera que cette méthode élimine le facteur temps et les difficultés de dosage du débit solide g sur le modèle ; il suffira que ce dernier soit tel que la pente soit constante quel que soit le débit q . Les Laboratoires Neyrpic ont satisfait à cette condition en assurant une circulation en circuit fermé des matériaux solides ; le débit solide aval étant immédiatement ramené au moyen d'un éjecteur sur l'amont du modèle. Il ne peut y avoir de ce

fait aucune translation du lit parallèlement à lui-même, le volume des matériaux dans le modèle étant constant. Le non-bascullement angulaire de la pente est obtenu en assurant la stabilité d'un point du profil situé le plus à l'aval. Cette stabilité s'obtiendra sur le modèle **en réglant le niveau aval pour chaque débit q** de façon à maintenir l'invariance de la pente dans le groupe d'essais relatifs à la valeur fixée pour cette dernière.

Mode opératoire. — Pour obtenir avec plus de précision la correspondance débit-hauteur sur le modèle des boucles, le laboratoire a préféré établir expérimentalement la loi de variation de la section mouillée moyenne s en fonction de q ; la section mouillée s étant la moyenne des sections mesurées sur 6 profils judicieusement choisis sur le modèle. On fait écouler sur le modèle, jusqu'à stabilisation de la ligne d'eau, un débit déterminé q mesuré au déversoir amont. On relève ensuite la pente, les sections mouillées et l'on en déduit la section mouillée moyenne, ce qui donne un point sur le graphique (s, q) . On répète l'opération pour divers débits décroissants en s'attachant, par un réglage approprié du niveau aval, à maintenir constante la pente de la ligne d'eau mesurée entre les sections extrêmes du modèle. On obtient ainsi pour la pente choisie la courbe de correspondance (s, q) modèle qu'il faut comparer avec la courbe analogue (S, Q) de la nature ; cette dernière se déduisant de mesures analogues faites sur le modèle à fond fixe servant d'instrument d'interpolation entre les relevés et jaugeages sur l'Isère.

On a, en similitude Froude, les relations suivantes entre s, q, S, Q :

$$s = \lambda \mu S$$

$$q = \lambda \mu^{3/2} Q$$

la loi section-débit dans la nature étant :

$$S = \varphi(Q)$$

cette loi devra être sur le modèle **si ce dernier est correct** :

$$\frac{s}{\lambda \mu} = \varphi\left(\frac{q}{\lambda \mu^{3/2}}\right)$$

ou, en coordonnées logarithmiques :

$$\log S = \Phi(\log Q)$$

et

$$\log s - \log \lambda - \log \mu = \Phi(\log q - \log \lambda - \frac{3}{2} \log \mu)$$

Comme λ est fixé ($\lambda = \frac{1}{250}$) on peut par

déplacement préalable des axes s et q , éliminer le terme $\log \lambda$ de sorte que la courbe section

débit (modèle) se déduira de celle de l'Isère, dans cette représentation, par une simple translation de pente $3/2$, ce qui facilite beaucoup les comparaisons (fig. 3).

fig. 3

Nous ne pouvons donner ici le détail des résultats obtenus, mais seulement les conclusions.

Dès que le débit solide devient général on constate que la courbe (s, q) devient, sur le graphique, rectiligne avec une pente égale à $3/2$ (le coefficient de Chézy modèle devenant constant). Il en est de même sur la courbe $(S - Q)$ nature. Par suite les 2 courbes devraient avoir pour un modèle parfait leur partie rectiligne dans le prolongement l'une de l'autre.

Pour les pentes essayées comprises entre 3, 5 et 6 mm/m, les débits modèle se sont révélés toutefois légèrement supérieurs aux débits Isère en similitude Froude. Il ne serait possible de réaliser l'égalité des nombres de Froude qu'en coulant sur modèle avec des pentes assez faibles, ce qui offrirait l'inconvénient de diminuer l'ampleur des phénomènes qui se produiraient à la suite d'une coupure et d'accroître les difficultés des observations. Le laboratoire a donc jugé préférable d'admettre sur le modèle un nombre de Froude légèrement supérieur à celui de l'Isère et de conserver une pente à l'échelle : ceci est possible avec une échelle des débits bien déterminée et constante car toutes les courbes $(s-q)$ modèle pour diverses pentes sont semblables entre elles, et semblables à la courbe de l'Isère.

On a admis finalement $\mu = 1/50$ comme pour le modèle à fond fixe, d'où une distorsion nulle pour les pentes. Pour cette valeur de μ a été tracée avec précision la courbe $(s-q)$ (modèle) et par comparaison avec celle de

l'Isère on en a déduit la correspondance entre les débits modèle q et le débit Q qui est :

$$q = 1,23 \lambda \mu^{3/2} Q$$

Le rapport des nombres de Froude du modèle et du prototype est donc égal à 1,23.

Le nombre de Froude de l'Isère étant

$$\frac{V}{\sqrt{g y}} = 0,4 \text{ environ,}$$

celui du modèle sera 0,49 environ ; le laboratoire a admis que ces nombres sont suffisamment voisins entre eux et éloignés tous deux de l'unité (qui correspond au régime torrentiel) pour que l'influence de cet écart soit négligeable sur la forme des lignes d'eau et sur les phénomènes d'érosion lors de l'ouverture d'une coupure.

On a par ailleurs vérifié la correspondance des débits de commencement d'entraînement avec cette échelle des débits et pu calculer, d'après observation du modèle, que l'entraînement devait commencer sur le prototype pour des débits voisins de 300 m³/s, chiffre en bon accord avec celui qui était admis à priori.

Enfin, pour la commodité des essais ultérieurs, la correspondance (q - h) sur modèle a été rendue automatique grâce à un déversoir situé à l'aval du modèle et formé d'une plaque métallique découpée dont l'ouverture a été ajustée débit par débit, de manière à assurer la hauteur d'eau résultant des essais antérieurs pour le maintien de la pente à la valeur finalement retenue.

Il serait évidemment possible d'obtenir un modèle plus parfait, diminuant la distorsion des débits, en utilisant un matériau plus rugueux comportant moins de fin et aussi moins dense. Toutefois les résultats obtenus avec l'anthracite paraissent suffisamment près de la vérité pour qu'il semble inutile, pour le moment, de poursuivre la recherche d'un matériau nouveau, recherche qui aurait probablement demandé encore des délais trop importants.

Les essais préliminaires signalés ci-dessus ont donc permis de déterminer l'échelle des hauteurs à admettre sur les modèles à fond mobile ainsi que l'échelle des débits. Il devenait dès lors possible de passer sur la première boucle (Bois Français) aux essais de coupure proprement dits.

XII. — ESSAIS DE COUPURE DE LA BOUCLE DE BOIS FRANÇAIS.

a) Dispositif opératoire.

— L'alimentation amont du modèle : par déversoir triangulaire étalonné et partiteur com-

mandé destiné à reproduire automatiquement les cycles de crue.

— Circulation des matériaux en circuit fermé ;

— Mesure des niveaux ; par prises de pression de 50 mm. de diamètre protégées par grilles à mailles de 2 mm. formant filtre et pots de mesure ;

— niveau aval réglé par le déversoir spécial précédemment décrit, réalisant la correspondance hauteur-débit nécessaire.

b) Tracé de la coupure — barrage de garde

Le tracé de la coupure a été implanté approximativement suivant le projet de l'Administration ; on a commencé par un tracé rectiligne pour faciliter la mesure des profils en long, réservant pour la suite l'étude du tracé optimum en plan.

L'avant-projet de coupure prévoit, comme déjà signalé, l'établissement d'un chenal pilote d'environ 25 m. de largeur sur deux mètres de profondeur, qui serait agrandi, par l'action même des eaux dérivées dans la coupure, jusqu'à sa largeur définitive d'environ 182 mètres. Les bords de la coupure seront délimités par des digues perrayées à 45° établies avant toute ouverture, de façon à éviter les divagations des eaux. Sur le modèle, on a simplement établi un canal rectiligne de 0 m. 40 de largeur rempli du matériau adopté au niveau du terrain naturel, ainsi que le chenal pilote, à l'échelle.

Pour rester maître des phénomènes d'érosion dus à l'ouverture de la coupure et pour pouvoir partager à volonté les débits liquides entre la coupure et la boucle, le projet prévoit l'établissement, en tête de la coupure, d'un barrage de garde à quatre pertuis dont le seuil inférieur est arasé à la cote prévue pour le fond définitif probable de la rivière après coupure de toutes les boucles et muni d'un vannage formé de poutrelles de 0 m. 60 de hauteur groupées en deux rangées ; une rangée amont formant seuil de fond, destinée à limiter l'érosion régressive du lit en amont de la coupure, sous l'action du remous d'abaissement causé par l'ouverture de cette dernière et une rangée aval destinée à former mascue contre les crues.

Ce dispositif est bien entendu schématique et pourrait être remplacé en exécution par un système de vannage différent. Il convient toutefois de remarquer à priori que les manœuvres destinées à abaisser le seuil du barrage n'auront lieu qu'à intervalles très éloignés au fur et à mesure du creusement des fonds. Sur le modèle, le barrage, son radier et ses poutrelles ont été matérialisés à l'échelle ($\lambda = 1/250$ $\mu = 1/50$) avec deux pertuis seulement, ce qui ne présente aucun inconvénient et simplifie la manœuvre.

c) Programme des recherches.

L'ouverture d'une coupure provoque un abaissement du niveau de la rivière immédiatement à l'amont, d'où remous d'abaissement et érosion de la partie amont de la rivière. Il s'ensuit un accroissement des apports solides à l'entrée de la branche aval de la rivière. Il convient de connaître les effets de ce surcroît de débit solide qui peut se traduire, à priori, par un exhaussement des fonds puis de la ligne d'eau en aval de la coupure ; d'où le plan schématique des recherches.

fig. 4

1° Etude du mécanisme de l'évolution de la rivière à la suite de l'ouverture d'une coupure, érosion de la branche amont ;

2° Evolution des fonds dans le canal de coupure et dans la boucle ;

3° Evolution dans la branche aval-présence ou absence d'exhaussements ;

4° Etude des facteurs pouvant réagir sur l'exhaussement éventuel dans la branche aval, à savoir :

a) Vitesse d'ouverture du barrage, c'est-à-dire abaissement plus ou moins rapide du seuil formé par les poutrelles retenant le lit de gravier ;

b) Manœuvres appropriées du barrage au cours des fluctuations du débit de la rivière ;

c) Apport solide à l'amont de la coupure — influence de la longueur du modèle en aval de la coupure ;

d) Influence de la forme et de la durée des cycles représentés sur le modèle.

d) Essais.

On a fait choix, pour le cycle des débits à faire passer sur le modèle, d'un cycle type moyen représentant à l'échelle, les débits variables de l'Isère pendant une année, déduits d'observations sur une

dizaine d'années ; le minimum (étiage) étant de 100 m³ et le maximum (forte crue) de 600 m³ seconde. Ce cycle est reproduit identiquement toutes les heures sur le modèle (cette durée n'ayant du reste rien de commun avec la véritable échelle des temps du modèle) au moyen d'un appareil automatique commandant le partiteur et asservi au déroulement d'une came taillée en conséquence.

Les essais sont conduits comme ci-après sur le lit du modèle : le canal de coupure étant préalablement rétabli à sa forme initiale et le barrage de garde complètement fermé, on fait circuler les débits permanents puis des cycles de débits jusqu'à ce que l'on retrouve les lignes d'eau stables correspondant aux essais précédents (il faut 8 à 10 cycles à cet effet).

On repère alors les niveaux des lignes d'eau correspondant aux débits de 100 m³/sec., 330 m³/sec., 600 m³/sec. aux diverses prises de pression établies le long du modèle et désignées par leurs numéros sur le plan (N° III).

C'est seulement après, que l'on commence les opérations d'ouverture du barrage en retirant progressivement les poutrelles, soit sur toute la largeur du barrage, soit par demi-longueur, et au moment des basses eaux. Le « degré d'ouverture » du barrage est défini comme étant le nombre de rangées de poutrelles enlevées sur toute la largeur du barrage depuis le début de l'essai. Suivant qu'entre deux numéros d'ouverture consécutifs le nombre de cycles de débit passant sur le modèle sera plus ou moins élevé, la vitesse d'ouverture du barrage sera dite plus ou moins grande.

Pour chaque degré d'ouverture du barrage, on repère les niveaux de la ligne d'eau aux diverses prises de pression pour les trois débits précités 100 m³/sec., 300 m³/sec., 600 m³/sec. et on note leurs abaissements ou exhaussements par rapport aux valeurs avant ouverture de la coupure ; les résultats sont traduits en courbes, donnant l'évolution des niveaux à chaque prise, pour un débit déterminé, en fonction du degré d'ouverture du barrage, ce qui permet une comparaison aisée des résultats.

a) Résultats généraux de ces premiers essais.

Il nous est difficile de donner ici un compte rendu détaillé de ces premiers essais et de leurs résultats (qui ne s'appliquent du reste qu'à la seule coupure de Bois Français).

Le but de la présente note est surtout d'exposer l'esprit et la technique des essais, d'en faire ressortir les difficultés sérieuses et de signaler l'importance des réglages préalables de tout modèle à fond mobile.

Nous indiquerons donc seulement les grandes lignes des premiers résultats déduits des essais concernant la coupure de la boucle de Bois Français.

1° Évolution de la branche amont de la rivière.

Le phénomène d'érosion est très marqué et il se produit de façon assez régulière. Il est d'autant plus violent, que la rapidité d'ouverture du barrage est plus grande. Toutefois, au « temps » correspondant à une même ouverture du barrage l'érosion se propage d'autant moins loin à l'amont que la manœuvre du barrage était plus rapide, ce qui est du reste conforme à l'intuition. En l'absence de toute coupure sur la boucle du Taillat, on constate que le fond de la rivière s'établit au niveau de la poutrelle n° 5, au droit du barrage.

2° Évolution de la coupure et du canal pilote.

La loi de variation du débit (q) admis dans la coupure en fonction du débit total (Q) de la rivière, en amont de la boucle, dépend étroitement du calage en hauteur du pertuis compris entre le masque aval et les poutrelles en place de la rangée amont, pour un degré d'ouverture donné du barrage (nombre de poutrelles enlevées).

Dans les premiers essais, le masque aval et le barrage amont étaient formés chacun de cinq poutrelles ; le pertuis était donc calé assez bas : le débit admis dans la coupure dépendait ainsi assez peu du débit total en amont de la boucle (fig. 5 courbe 1). Par ailleurs, le niveau de l'eau au confluent coupure-boucle est pratiquement indépendant du partage du débit (Q) entre la boucle et la coupure.

fig. 5

Aux faibles débits dans la rivière se produit donc, dans la coupure, un remous d'abaissement se traduisant par une érosion assez marquée ; quand le débit devient plus grand, ce remous diminue et s'annule même, les matériaux d'amont traversant le barrage ; et l'érosion est remplacée par un remblaiement partiel de la

coupure. La coupure subit ainsi une évolution alternative et alimente la branche aval de la rivière en fonction inverse de la puissance d'entraînement des eaux, ce qu'il convient d'éviter.

Pour cela la répartition des poutrelles a été modifiée et les essais ultérieurs ont été faits avec un masque aval comprenant 4 poutrelles ; un barrage amont comprenant 4 poutrelles, conduisant à un pertuis plus élevé.

Cette disposition modifie la courbe débit-coupure (q) en fonction du débit total (Q) dans le sens favorable (figure 5, courbe 2), en réduisant (q) pour les faibles valeurs (Q) donc l'érosion de la coupure lors de sa mise en eau.

Pour les ouvertures partielles du barrage et les faibles débits de la rivière, le remous d'abaissement précité cause une érosion régressive qui approfondit le canal pilote sans augmenter beaucoup sa largeur. Quand le débit s'élève le canal s'élargit de façon régulière à l'intérieur de son endiguement.

Il semble donc que l'exécution des coupures à partir d'un canal pilote soit possible sans difficultés particulières.

3° Évolution dans la boucle.

Dans la limite des débits étudiés (100-600 m³/s) on n'a plus constaté de transport de matériaux dans la branche aval de la boucle dès la mise en eau de la coupure, du moins pour les essais ne comportant pas de fermeture totale du barrage au débit maximum. Tous les matériaux qui pénètrent alors dans la boucle au cours de l'essai se déposent dans la région amont en formant un massif d'engrèvement se propageant lentement vers l'aval sous l'action des eaux passant en surface.

Au cours des derniers cycles, le débit ne circule du reste pratiquement plus dans la boucle en période de basses et moyennes eaux (100 et 300 m³/sec.) par suite du remblaiement précité dans la boucle et aussi par suite de l'enfoncement de la rivière en amont de la coupure.

Il semble donc difficile de pouvoir procéder à un remblaiement hydraulique total des boucles comme cela avait été prévu initialement à l'avant-projet.

4° Évolution de la branche aval.

On constate, comme nous le craignons, des exhaussements dans cette branche, qui commencent à se produire après passage d'un certain nombre de cycles suivant l'ouverture de la coupure.

Ils proviennent de l'accroissement du débit solide arrivant à l'entrée de la branche aval par suite de l'érosion.

Ces exhaussements seraient particulièrement gênants si on ne pouvait les réduire, car ils entraî-

neraient des dragages qu'on veut en principe éviter dans toute la mesure du possible.

On a donc fait une série d'essais ayant pour but de les réduire au minimum.

a) Réduction de la vitesse d'ouverture du barrage.

Au cours des essais correspondants, l'enlèvement des poutrelles a été fait d'abord par moitié tous les cycles, puis tous les deux cycles, enfin tous les trois cycles.

Les relevés ont montré, comme il fallait s'y attendre, l'influence très favorable d'une diminution de la vitesse d'ouverture du barrage, les exhaussements sur le modèle étant réduits d'environ 30 % en fin d'ouverture pour la vitesse la plus lente.

b) Influence des manœuvres de fermeture du barrage à certaines périodes du cycle de crue, pour une même vitesse d'ouverture du barrage.

Ces manœuvres ont pour but de faire pénétrer dans la boucle une plus grande partie du débit solide en provenance de l'amont. Pendant ces fermetures l'érosion à l'amont de la coupure est arrêtée et tout le débit solide pénètre dans la boucle. Le meilleur effet a été obtenu pour des fermetures totales du barrage pour les débits supérieurs à 450 m³/s (vitesse d'ouverture : 1 poutrelle sur la largeur totale tous les 2 cycles).

L'effet est pourtant inférieur à celui provenant d'une réduction de la vitesse d'ouverture.

c) Effet de la suppression de l'alimentation solide du modèle.

La série d'essais correspondants présentait un intérêt particulier car elle permettait d'étudier d'abord le mécanisme d'évolution des fonds dans le cas où serait arrêté le débit solide venant de l'amont, soit par un barrage de retenue de gravier, soit par une souille de dragage. Ensuite il convient de se rappeler que l'alimentation solide du modèle a lieu en circuit fermé. Après ouverture de la coupure le débit solide d'alimentation à l'amont est donc grossi du débit solide dû à l'érosion régressive sur le modèle, et ce renvoi a lieu avec un décalage dans le temps qui dépend de la longueur du secteur aval du modèle.

Sur le modèle on constate qu'au bout d'un certain nombre de cycles de crues les courbes d'abaissement en amont de la coupure tendent à se stabiliser ou même à s'incurver momentanément dans le sens d'une remontée du fond, phénomène dû à la sursaturation du courant du fait du surcroît d'apport solide provenant de la circulation des matériaux en circuit fermé.

Dans la réalité les abaissements du lit seront sans doute compris entre les résultats extrêmes ainsi obtenus (circulation en circuit fermé, suppression de l'alimentation solide). Ces essais par-

ticuliers ont été conduits comme indiqué ci-après : le lit étant formé et le barrage de garde étant fermé, on supprime l'alimentation solide amont et on continue à faire passer les cycles de crues. Au bout de 10 cycles environ le profil devient sensiblement stable et l'on note, tout le long du modèle et pour les différents débits, des abaissements progressifs avec diminution corrélative de la pente de la rivière. Ce phénomène est en accord avec la théorie. On procède alors à l'ouverture du barrage de garde en reproduisant la même vitesse d'ouverture que pour une des expériences précédentes faites avec circulation des matériaux en circuit fermé.

On a constaté, d'après les courbes des relevés, une érosion régressive beaucoup plus marquée des fonds à l'amont de la coupure, et, ce qui est particulièrement intéressant, que les exhaussements à l'aval de la coupure cèdent la place à des creusements généralisés sauf au voisinage immédiat de cette coupure. Il semble bien toutefois qu'avec le temps ces légers exhaussements disparaîtront à leur tour.

D'après cette première série d'essais nous pouvons d'ores et déjà conclure sans gros risques d'erreurs :

1° Que l'effet de la coupure des boucles sur l'érosion des fonds de la branche amont de la rivière est certain et d'une amplitude suffisante pour le but recherché ;

2° Qu'il est possible d'opérer les coupures à partir d'un chenal pilote ;

3° Qu'il sera probablement impossible de procéder au remblaiement hydraulique complet des boucles ;

4° Que les exhaussements à l'aval des coupures pourront être maîtrisés ;

— soit en réduisant la vitesse d'ouverture des barrages de garde des coupures de façon à étaler dans le temps le surcroît de transport solide à imposer à la rivière du fait de l'érosion régressive due à l'ouverture des coupures ;

— soit en arrêtant, au moyen de souilles de dragage transversales fixes, le débit solide amont en des points judicieusement choisis.

Le programme complémentaire suivant a donc été décidé :

1° Essais de coupure de la boucle de la Taillat et de ses répercussions sur les surélévations constatées à l'aval de la coupure de Bois Français, répercussions qu'il y avait tout lieu de croire favorables ;

2° Essais spéciaux ayant pour but de déterminer du mieux possible l'échelle des temps, etc...

3° Les essais de coupure de la boucle des Sablons seront réservés, car il semble d'ores et déjà que la coupure de cette boucle de faible longueur ne s'avérera pas nécessaire.

NOTE COMPLÉMENTAIRE

Il nous est malheureusement impossible, la place nous étant limitée, de donner des détails sur les essais du programme complémentaire qui a été réalisé conformément aux prévisions et nous a fourni de très précieux renseignements.

Comme nous l'avons déjà signalé, nous avons eu pour but essentiel, dans la présente note, d'exposer les méthodes de recherche et d'essai utilisées par le laboratoire pour l'étude du problème qui lui avait été posé. Nous ne pouvons indiquer, ici, les résultats de détail des essais, pas plus que leurs interprétation et utilisation finales en vue de la mise au point du projet général d'aménagement de l'Isère, mise au point qui incombe en propre au maître de l'œuvre et qui doit tenir compte de beaucoup d'autres éléments (rapidité d'obtention des résultats, modalités d'exécution, dépenses et financement).

Les essais entrepris dépassent toutefois nettement le cadre du problème particulier qui les a

provoqués ; ils ont permis de bien voir l'allure et le sens de l'évolution du phénomène résultant de l'ouverture d'une coupure sur une rivière à fond mobile, de préciser les interactions résultant des ouvertures de deux coupures et de l'échelonnement dans le temps des manœuvres, enfin de donner une valeur approchée de l'amplitude des mouvements d'évolution des fonds. Le facteur « temps » correspondant à cette évolution reste malgré tout assez mal déterminé. Non seulement les laboratoires ne peuvent encore tenir compte de la complexité des données naturelles (cohésion des fonds, cycle réel des crues, granulométrie réelle des matériaux, etc...) mais encore en stylisant à l'extrême les phénomènes, ils sont déjà dans l'obligation de composer habilement avec plusieurs conditions incompatibles au sens des lois générales de la similitude, et ce n'est pas là leur moindre mérite. Nous tenons à les remercier tout particulièrement pour la collaboration précieuse qu'ils ont apportée à notre service à l'occasion des études générales sur l'Isère.

A PROPOS D'UNE PHOTOGRAPHIE DE LA RETENUE DU SAUTET

(Page 627 - N° Spécial A/1948)

Après l'article de M. LABAYE, nous présentions à nos lecteurs une photographie de la retenue du barrage du Sautet durant une vidange. Dans le commentaire qui l'accompagnait, nous faisons remarquer que : même dans la partie amont de la retenue, on ne décèle pas encore d'accumulation de matériaux se déplaçant normalement sur le fond ; seuls les éléments normalement charriés en suspension ont occasionné des dépôts.

Certaines observations de nos lecteurs, et en particulier des Ingénieurs de BONNE & DRAC et du Groupe DAUPHINE de la Direction de l'exploitation de l'Electricité de France, nous sont parvenues à ce sujet. Nos correspondants pensent que, contrairement à nos indications, une certaine quantité de matériaux charriés sur le fond s'est déposée à l'amont de la retenue.

Il n'y a là, en fait, aucune contradiction, et nous sommes particulièrement reconnaissants à nos amis d'avoir attiré notre attention sur les confusions auxquelles pouvait prêter un texte volontairement très concis. En effet, lorsque nous parlions de la « **partie amont** » de la retenue, il ne s'agissait absolument pas, dans notre esprit, de l'**extrémité** amont de la retenue : la zone représentée sur ce cliché qui est, comme nous le signalions, normalement recouverte de plusieurs dizaines de mètres d'eau, n'est pas à l'extrémité amont de la retenue, mais si l'on veut, dans la moitié amont de la retenue plus près de l'extrémité amont que de l'extrémité aval.

Il est bien certain, en effet, et cela a été constaté, que, à l'extrémité amont, on trouve un banc important de matériaux normalement charriés sur le fond, mais ce banc, malgré 15 ans d'exploitation, est encore relativement localisé. C'est ce fait que nous désirions signaler à l'attention de nos lecteurs.