

L'aménagement du Rhin à courant libre de Bâle à Lauterbourg

Training work on the Rhine between Bale and Lauterbourg

PAR

M. MARCHAL

ET

G. DELMAS

INGÉNIEUR EN CHEF

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

DU SERVICE DE LA NAVIGATION DE STRASBOURG

Le Rhin supérieur était resté jusqu'en 1840 à l'état sauvage. Le premier aménagement, entrepris dans le but de lutter contre les crues, consistait à rassembler les eaux moyennes dans un lit unique entre deux digues de « correction », et à limiter le débordement en cas de hautes eaux par des digues d'inondation situées en retrait. Cependant, le lit moyen corrigé était plus court que l'ancien talweg, et l'augmentation de la pente et des vitesses provoqua un approfondissement continu du fond du lit en aval de Bâle qui se poursuit actuellement en s'étendant vers l'aval. Afin de permettre le développement de la navigation, on procéda ensuite à la régularisation du lit mineur grâce à un système continu d'épis destinés à fixer les bancs de gravier alternativement sur l'une et l'autre rive. Les résultats furent très satisfaisants et permirent le développement des ports de Strasbourg, Kehl et Bâle. Cependant, la permanence des ouvrages restait menacée par l'érosion continue du fond, qui pourra s'étendre avec le temps jusqu'à l'aval de Lauterbourg. Avec l'aide des laboratoires de Karlsruhe et Zürich, on chercha donc une méthode propre à consolider le fond du lit, soit par des groupes de seuils de fond, soit par une couverture continue en gros matériaux. Mais les solutions mises au point ne permettaient pas d'assurer également des conditions de navigation normales. On fut donc amené à y renoncer, d'autant que les progrès de l'aménagement du Rhin par E.D.F. entre Bâle et Strasbourg permettaient d'espérer, sur ce secteur au moins, une solution au problème de l'érosion. Bien que n'ayant pu le résoudre, les travaux de régularisation ont permis de créer rapidement une voie navigable; le type de construction des épis a été sans cesse amélioré, et parfaitement mis au point grâce à des essais sur modèle exécutés à Zürich.

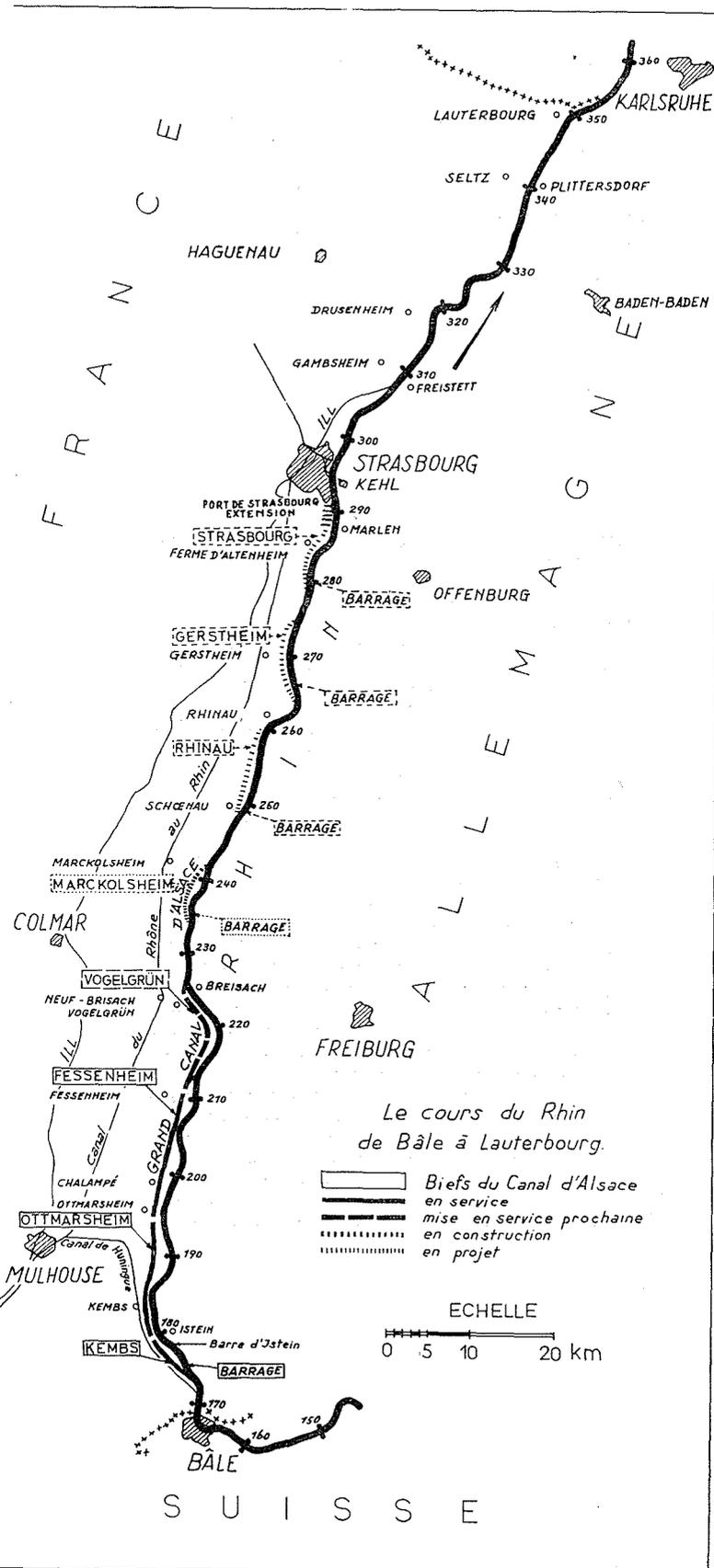
Le Rhin supérieur était resté jusqu'en 1840 un fleuve à l'état sauvage, au lit parsemé d'îles souvent très étendues séparées par une succession de chenaux et de faux-bras, et s'étendant au total sur une largeur de 2 à 3 km. A chaque

The Upper Rhine remained in its natural state until 1840. The first work designed to combat the floods consisted of confining the mean flow between two training dykes, and reducing flooding during high water by means of flood dykes standing back from the training dykes. However, the trained average bed was shorter than the old thalweg, and increased slopes and velocities caused the river bed downstream of Bale to deepen continuously, a process which is still going on and which is extending downstream. In order to improve navigation, the minor bed was then trained by means of a continuous system of groynes designed to make banks of gravel form in succession on each bank. This gave very satisfactory results and made it possible to develop the ports of Strasbourg, Kehl and Bale. However, the continued existence of the structures was threatened by continuous erosion of the river bed which, given sufficient time, was capable of extending below Lauterbourg. With the cooperation of the Karlsruhe and Zurich laboratories a method was sought of consolidating the river bed by means of groups of artificial sills or by completely covering it with heavy material.

The methods that were developed did not also permit normal navigation so they were abandoned, but work done by E.D.F. on the Rhine between Bale and Strasbourg showed promise that the problem of erosion might be solved, at least on that sector. Although the problem was not solved, training work has made it possible to create a navigable waterway quickly; the groyne method has been constantly improved as a result of model tests carried out at Zurich.

crue du fleuve, de nouvelles îles se formaient, d'autres étaient englouties, le chenal était modifié. Les digues protégeant la plaine étaient fréquemment emportées.

Dans le fleuve lui-même, la profondeur des



eaux était faible ainsi que la vitesse du courant. La navigation s'y exerçait dans des conditions assez difficiles, comme l'exprime un rapport de 1833 : « Les grands bateaux qui remontent le Rhin sont halés par quatorze hommes qui tirent à la bricole. Ces haleurs sont fréquemment obligés de changer de rive à cause de l'irrégularité du lit, ce qui fait perdre un temps considérable. Aussi les bateaux qui remontent de Mayence à Bâle au moyen de halage mettent-ils vingt-trois à vingt-cinq jours pour faire ce voyage, à moins que, favorisés constamment par le vent du Nord, ils puissent déployer leurs voiles, et douze jours suffisent alors pour le trajet. A la descente, au contraire, en se servant de la rame, ils emploient deux jours pour aller de Bâle à Strasbourg. Le lendemain, ils arrivent à Lauterbourg, et trois jours après ils sont rendus à Mayence, port de relâche habituel de la navigation pour la partie supérieure du Rhin ».

Pour lutter contre les crues, le seul moyen efficace parut consister à supprimer les îles et à rassembler les eaux dans un lit unique. Le projet, établi par le colonel badois Tulla, prévoyait l'endiguement du Rhin entre deux rives aussi rectilignes que possible. Les travaux, exécutés de 1840 à 1860, modifièrent complètement la physionomie du fleuve en l'endigant entre deux berges perreyées, distantes de 220 à 250 m. Certains alignements sont absolument droits sur une dizaine de kilomètres, ce qui donne au lit actuel du Rhin un caractère assez artificiel (fig. 1).

Les berges du lit moyen ainsi créé ne sont plus submergées que par les crues importantes; le débordement de celles-ci est limité, sur chaque rive, par un système continu de digues d'inondation situées parfois à plus d'un kilomètre en retrait. Les seules coupures dans ce système de protection correspondent au débouché dans le Rhin des affluents, au droit desquels un tracé des digues en tiroir permet de faire mourir le remous du Rhin en crue au niveau du terrain naturel suffisamment à l'amont.

Si ces travaux eurent d'heureux effets pour la protection contre les crues, une autre conséquence fut d'augmenter très notablement la vitesse de l'eau; n'ayant pas adopté un tracé curviligne en conservant autant que possible les formes naturelles des bras principaux, les ingénieurs aboutirent à un raccourcissement du talweg, entre Bâle et l'embouchure de la Lauter, de 32 km, soit de 14 % de sa longueur; la pente et la vitesse de l'eau étant ainsi accentuées, ainsi que la force d'entraînement, le Rhin se mit à charrier en temps de crue de grandes quantités d'alluvions, et la tendance à l'érosion qui se manifestait déjà avant la correction fit



FIG. 1

(Photo I.G.N.)

La correction du Rhin. On distingue d'anciens faux-bras, ainsi que les épis
(photo prise pendant les basses eaux de 1947).

place, dans le secteur amont où la pente est la plus forte, à un approfondissement continu du fond du lit entre Bâle et Marckolsheim atteignant en moyenne 6 cm/an; à Chalampé, où il atteint 10 cm/an, le Rhin s'est creusé depuis 1840 de plus de 7 m. Le fleuve y coule maintenant entre deux berges extrêmement encaissées

qui ne sont pratiquement jamais recouvertes par les eaux même en période de crue. C'est cet approfondissement qui a fait émerger en face du village de Kembs la barre rocheuse d'Istein (à 8 km en aval de Bâle) autrefois profondément enfouie sous le fond du lit et qui est devenue peu à peu un obstacle infranchissable pour la

navigation, jusqu'au moment où elle fut contournée par la mise en service en 1933 de la dérivation de Kembs, premier bief du Canal d'Alsace. D'autres bancs rocheux avaient été repérés également à Niffer, à quelques kilomètres à l'aval de Kembs, à 80 cm seulement en dessous du fond du lit; l'approfondissement continuant, ces bancs auraient fini par constituer des obstacles aussi importants que ceux d'Istein, et seule la construction du bief d'Ottmarsheim a permis de résoudre cette difficulté. Cette érosion se poursuit actuellement, en s'étalant vers l'aval.

Tel quel, le lit corrigé du fleuve ne se prêtait guère à une navigation active. Entre les mouilles profondes situées alternativement sur l'une et l'autre rive, l'écoulement sur les seuils était en basses eaux souvent presque transversal à l'axe du lit moyen; la profondeur sur ces seuils très nombreux était faible. Enfin, l'ensemble des

formes du lit mineur progressant constamment vers l'aval, les positions des mouilles et des seuils changeaient sans cesse, et seuls des pilotes locaux spécialement familiarisés avec ce secteur du fleuve pouvaient y conduire des bâtiments avec sécurité.

Afin de rendre le Rhin navigable en période de basses eaux, il était nécessaire de régulariser son lit mineur grâce un système d'épis qui auraient l'avantage, en fixant les bancs de gravier, de fixer également les formes du chenal jusque-là en perpétuelle évolution. Cet aménagement est terminé depuis 1924 sur le secteur Strasbourg-Lauterbourg; il ne fut entrepris entre Bâle (ou plutôt Istein) et Strasbourg qu'à partir de 1930, et peut y être considéré comme terminé à l'exception de la stabilisation du profil du fond du lit. La mise en service du 4^e bief du Canal d'Alsace va d'ailleurs permettre prochainement de le contourner de Bâle à Brisach.

LA RÉGULARISATION SUR LE SECTEUR STRASBOURG-SONDERNHEIM

La régularisation du secteur Strasbourg-Sondernheim (à 29 km en aval de Lauterbourg), entreprise en 1906, fut terminée en 1924.

De Strasbourg à Lauterbourg, le Rhin a une longueur de 57 km. La pente décroît régulièrement entre ces deux villes de 0,60 m à 0,40 m/km. Le débit d'étiage au-dessous duquel les eaux ne descendent que vingt jours par an

en moyenne est de 476 m³/s à Strasbourg, où les eaux moyennes atteignent 1 043 m³/s et les grandes crues 5 500 m³/s. La vitesse superficielle moyenne de l'eau dans le talweg décroît entre Strasbourg et Lauterbourg de 2,20 m à 1,60 m/s en basses eaux, de 2,80 m à 2 m/s en eaux moyennes, et de 3,20 m à 2,40 m/s en hautes eaux.

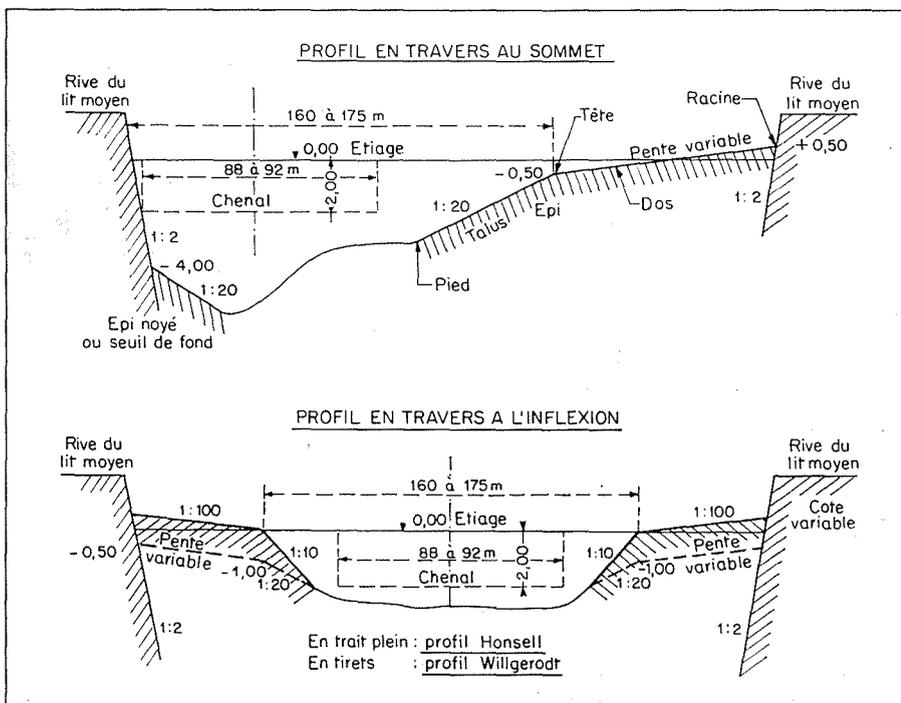


FIG. 2

Profils en travers du Rhin régularisé entre Strasbourg et Sondernheim.

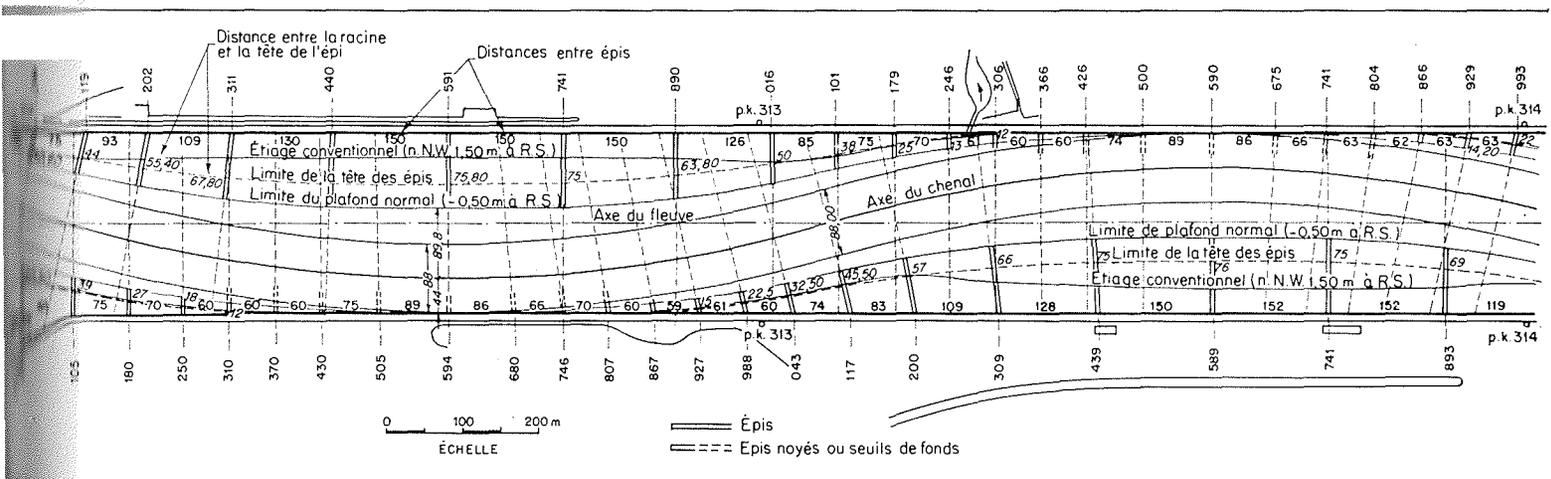


FIG. 3

Plan du Rhin avec indication des ouvrages de la régularisation.

On s'est proposé de réaliser un chenal navigable de 88 à 92 m de largeur et de 2 m de profondeur minimum sous l'étiage conventionnel fixé à l'époque à 500 m³/s à Strasbourg (actuellement 476 m³).

Deux projets, inspirés l'un et l'autre des principes de Girardon, se trouvaient en présence : celui de l'ingénieur badois Honsell (1897) et celui de l'ingénieur alsacien Willgerodt (1898), entre lesquels on trouva un compromis. Leurs principales différences portaient sur le tracé du lit mineur, pour lequel Willgerodt prévoyait un plus grand nombre de courbes afin de ne pas s'écarter de la longueur d'onde normale dans les bons passages naturels et de ne pas diminuer sensiblement la longueur du talweg, et surtout sur la détermination du profil en travers.

L'axe du lit mineur a été tracé selon des arcs de lemnicate. Les sommets sont placés autant que possible dans les concavités de la rive du lit moyen; ils peuvent toutefois être placés dans une convexité pourvu que la courbure n'y dépasse pas une certaine valeur. Willgerodt avait proposé que la distance entre deux inflexions consécutives ne s'écarte pas sensiblement de l'espacement qu'on observait entre deux mouilles dans l'état naturel, soit 900 m; dans le tracé adopté, cette distance varie entre 800 et 1 700 m. La largeur du lit mineur, sensiblement la même au sommet et à l'inflexion, est fixée à une valeur croissant de 160 m à Strasbourg, à 175 m à Lauterbourg.

La figure 2 montre les profils en travers dans les deux projets Honsell et Willgerodt : au sommet, où ils sont confondus, et à l'inflexion. L'inclinaison du talus des épis varie régulièrement du sommet à l'inflexion. Au sommet de

courbure, le profil en travers était limité par des seuils de fond dont la racine était à 4 m sous l'étiage et la pente de 1/20. En réalité, de même que nous le verrons à propos du secteur Strasbourg-Bâle, ces seuils de fond dont le but était ici d'atténuer la dissymétrie du profil en travers au sommet de courbure en élargissant le chenal, n'ont été construits que très partiellement, sur une faible longueur à partir de la rive. De tenue assez précaire, ils n'ont, sauf exception, pas été entretenus et beaucoup ont pratiquement disparu.

Willgerodt s'était imposé de ne pas réduire les surfaces d'écoulement naturelles et de guider les eaux du sommet à l'inflexion par un relèvement progressif du fond; il proposait donc d'abaisser de 1 m le niveau des seuils de fond au sommet et, à l'inflexion, d'abaisser les têtes des épis à 1 m sous l'étiage. L'expérience a montré la supériorité des profils en travers Honsell sur ceux de Willgerodt, les épis plus élevés des inflexions assurant un guidage plus efficace favorable à l'orientation des seuils et à l'augmentation de leur profondeur.

La figure 3 donne les dispositions des ouvrages en plan. Du sommet de la concavité du lit mineur au sommet de la convexité d'aval, les épis sont normaux à la rive du lit mineur de façon à assurer le décollement de la mouille; ils sont ensuite normaux à la rive du lit moyen.

Les ouvrages ont été construits en immergeant une rangée de gabions en fascines ou en grillage métallique galvanisé de 8 à 10 m de longueur et 0,90 m de diamètre, remplis de moellons d'enrochement de 40 à 100 kg et placés dans le sens du courant. Devant cette rangée de gabions le gravier se dépose; on peut d'ail-

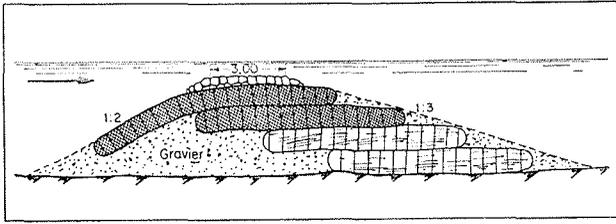


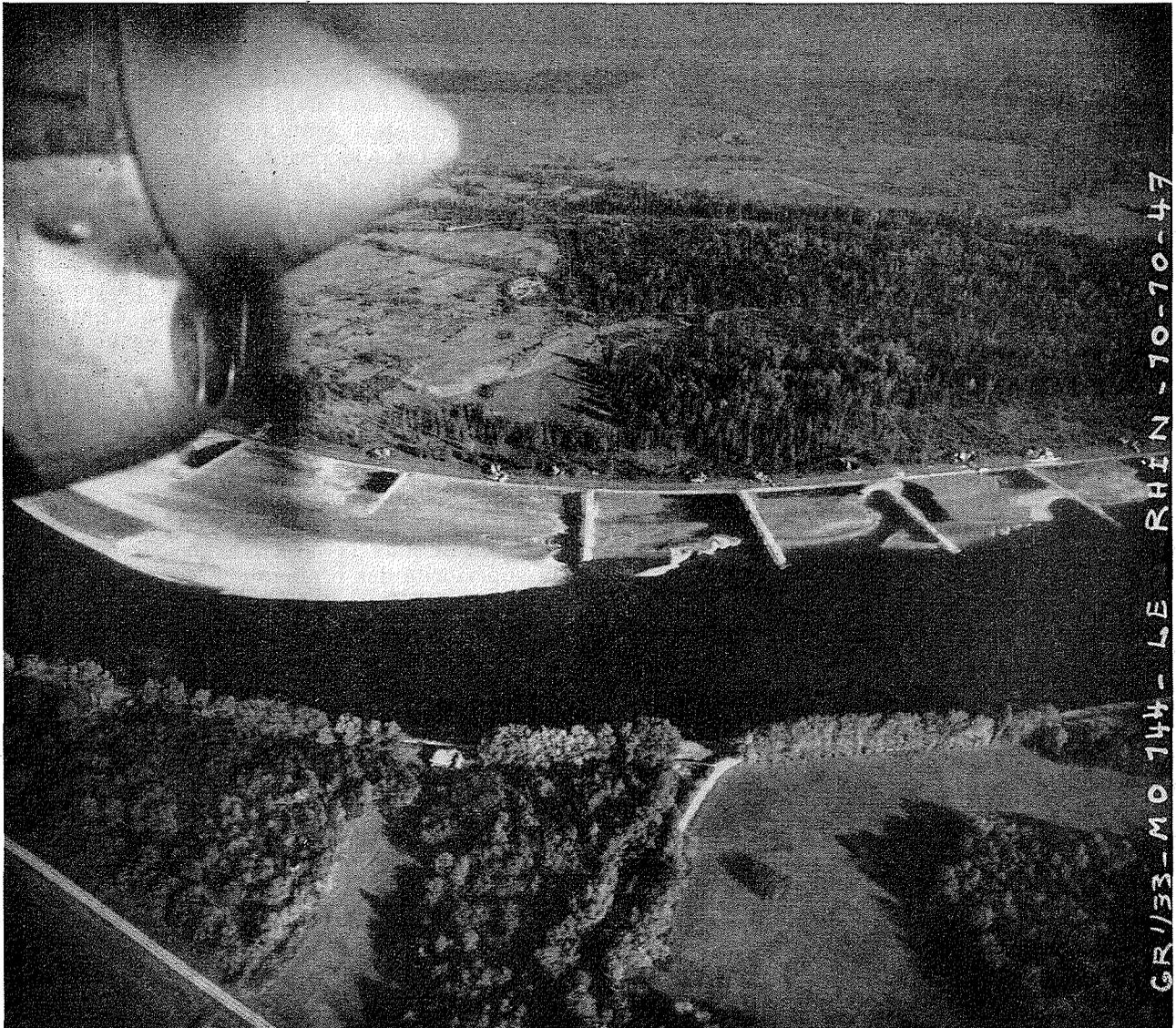
Fig. 4

Coupe en travers schématique d'un épi.

Fig. 5

Epis attenants à une rive convexe. Photo prise en basses eaux. On distingue le couronnement des épis.

(Photo I.G.N.)



leurs activer ces dépôts par l'immersion de produits de dragages. On place alors une seconde rangée décalée vers l'amont, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'ouvrage ait atteint la hauteur voulue; le couronnement reçoit ensuite un revêtement en pavage de moellons exécuté à sec ou en gabions de treillis métallique (fig. 4 et 5).

Les résultats obtenus ont été satisfaisants, et la profondeur disponible sous l'étiage est comprise entre 1,70 m et 2 m pour les seuils les plus défavorables. Cependant, l'interruption des travaux d'entretien pendant la guerre s'est soldée par des dégâts assez importants aux ouvrages, et nous verrons plus loin comment des études ont permis de modifier avantageusement leur mode de construction et de réparation, qui se bornait à des rechargements de gabions.

La figure 3 montre qu'on a été amené à réaliser un système d'épis absolument continu, dont l'entretien ajouté à celui des berges entièrement perreyées est assez onéreux, mais qui apparaissait indispensable pour rétablir dans le lit artificiel créé par la correction un chenal dont les sinuosités correspondent aux formes naturellement stables. L'entretien du chenal lui-même se réduit par contre à des dragages en certains points singuliers où les dispositions des ouvrages (ports, affluents) n'ont pas permis d'adopter une longueur d'onde convenable. Notons en outre que l'entrée nord du Port de Stras-

bourg, débouchant dans le chenal peu avant qu'il ne commence à s'éloigner de la rive, crée une surlargeur du plan d'eau juste à l'amont de l'endroit où le courant se brise sur les premiers épis tendant à le rejeter au large; d'où formation après chaque période de crue d'un haut-fond devant l'entrée du port, qu'il faut draguer fréquemment. A l'entrée sud du port, par contre, située le plus en amont possible du point de contact théorique du chenal avec la berge, les profondeurs s'entretiennent naturellement.

LA RÉGULARISATION A L'AMONT DE STRASBOURG

Sur ce secteur, où la pente décroissait régulièrement de 1 m/km environ dans la région de Kembs à 0,60 m à Strasbourg, le but recherché était de créer un chenal de 75 m de large à 2 m de profondeur sous le plan d'eau correspondant au débit de 540 m³/s à Bâle (débit atteint ou dépassé en moyenne 320 jours par an).

Les travaux furent entrepris en 1930 sur la base d'une Convention entre l'Allemagne, la Suisse et la France, cette dernière seule ne participant pas aux frais puisque l'aménagement

de ce secteur intéressait essentiellement les ports de Brisach et de Bâle, mais apportant sa collaboration technique et administrative. Sous l'égide d'une « Commission des Travaux » groupant des représentants des trois pays, la « Direction des Travaux » fut confiée au Service allemand de navigation.

Le projet s'inspirait des expériences faites à l'aval de Strasbourg, et la figure 12 montre la disposition des profils en travers au sommet et à l'inflexion (R.W. représente le « niveau de régularisation »). Le mode de construction des

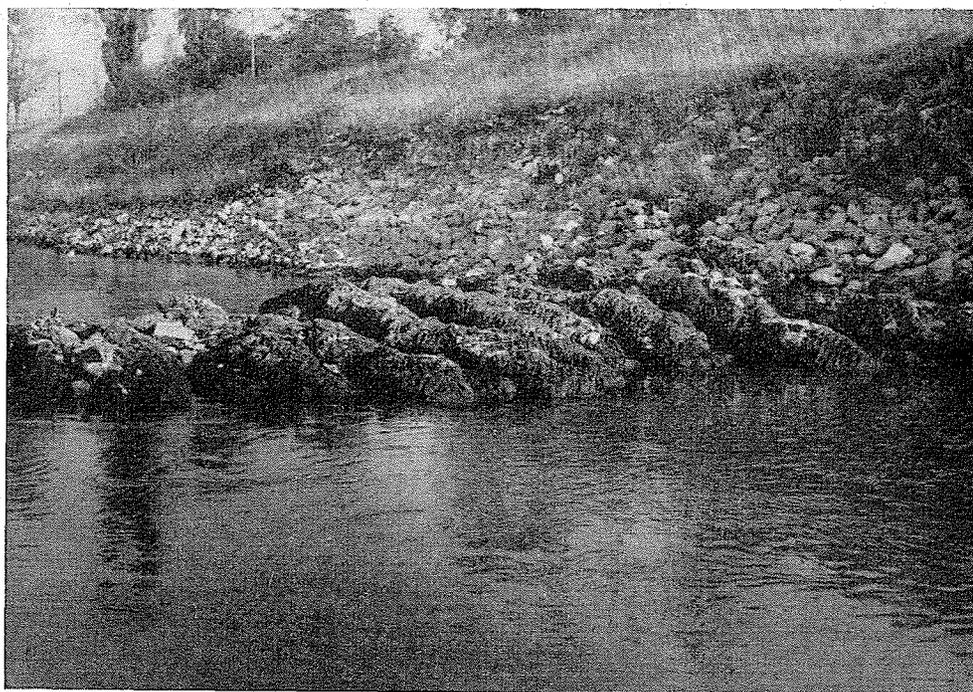


FIG. 6

Epi construit
en gabions.

(Photo S.F.E. Berne)

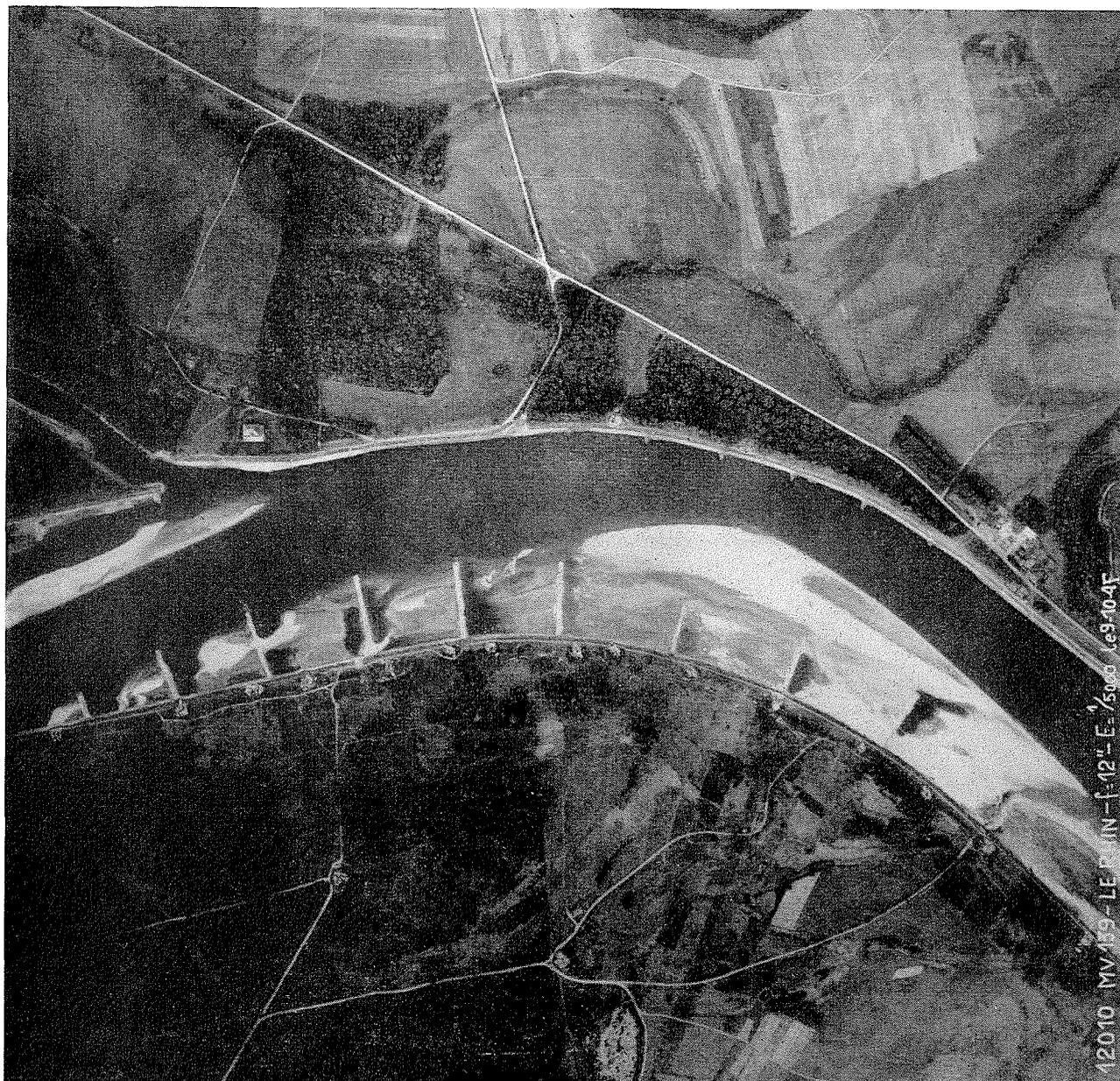


FIG. 7

Erosion à l'aval des premiers épis courts.

(Photo I.G.N.)

ouvrages s'apparentait à celui utilisé à l'aval de Strasbourg (fig. 6 montrant un épi construit en gabions). Pour vérifier la largeur à donner au lit mineur entre les épis, on put tenir compte des observations faites entre Strasbourg et Sondernheim sur le rapport entre la largeur du lit mineur théorique et celle du chenal effectif. Transposées dans un secteur de pente plus forte, elles aidèrent à en fixer la valeur à 1,16 à Istein

(pente moyenne 1 ‰), 1,29 à Brisach et 1,48 à Strasbourg.

Une nouvelle préoccupation s'imposait cependant aux auteurs du projet, du fait de l'érosion continue du fond dans le secteur Marckolsheim-Bâle, érosion qu'il fallait empêcher pour assurer la permanence des ouvrages. La protection contre l'érosion devait d'ailleurs être prévue également sur le secteur Marckolsheim-Strasbourg

où, supprimée à l'amont, elle n'aurait pas manqué de se reporter. On comptait déjà obtenir une diminution de l'érosion grâce aux dispositions du lit mineur tendant à créer aux sommets de courbure un profil de moindre force de charriage en en atténuant la dissymétrie, et prévoyant aux points d'inflexion la forme d'une cuvette très évasée. On prévoyait surtout d'augmenter la résistance du fond contre l'érosion par des groupes de 5 seuils de fond qu'on avait initialement prévus seulement aux sommets de courbure. Ces seuils, dont la figure 12 donne les dispositions envisagées, devaient autant que possible être rattachés aux épis, le tout ne formant plus qu'un seul et unique ouvrage à travers le fleuve. Leur hauteur moyenne était de 3 m sous le plan d'eau de régularisation. On réalisait ainsi une fixation complète du profil en travers à chaque sommet du chenal, impliquant l'arrêt complet de l'érosion.

Cette disposition ne fut jamais réalisée. On ne construisit en fait qu'un certain nombre d'amorces de seuils de fond à partir des rives, qui avaient surtout l'intérêt d'élargir le chenal aux sommets de courbure. Nous verrons que des études très poussées conduisirent à renoncer à ces seuils; ceux amorcés ne furent pas entretenus, si bien qu'il n'en subsiste actuellement qu'en un ou deux points particuliers, dont une courbe très prononcée. L'érosion ne fut donc pas arrêtée, et il faut sans doute y trouver une des

causes des dommages importants subis par les épis pendant la guerre.

Avant de revenir sur cette question essentielle de l'érosion et des tentatives faites pour la combattre, indiquons que les résultats des travaux furent satisfaisants, une voie navigable acceptable étant déjà créée au bout de 4 à 5 ans. La profondeur minima sur les seuils y est en général de peu inférieure à celle obtenue à l'aval de Strasbourg. Une conséquence particulière de la régularisation, observée aussi à l'aval de Strasbourg, fut la formation, immédiatement à l'aval des trois ou quatre premiers épis de chaque champ, de mouilles extrêmement profondes atteignant de 4 à 8 m sous le niveau de régularisation (fig. 7). Dues à de violents tourbillons créés par les épis obligeant les eaux à quitter la rive, et distantes de la rive de 25 à 30 m et souvent moins, elles amenaient l'effondrement et la ruine des perrés des berges; ce qui obligea à renforcer le pied des berges dans ces zones tout en adoucissant la pente du talus.

Un autre problème particulier fut posé par la configuration du chenal dans la courbe très prononcée de la Ferme d'Altenheim (rayon 890 m), à quelques kilomètres en amont de Strasbourg. La largeur y était absolument insuffisante, obligeant à maintenir jusqu'au-dessus des eaux moyennes un passage à sens unique pour la navigation (fig.8). Le long de la rive gauche

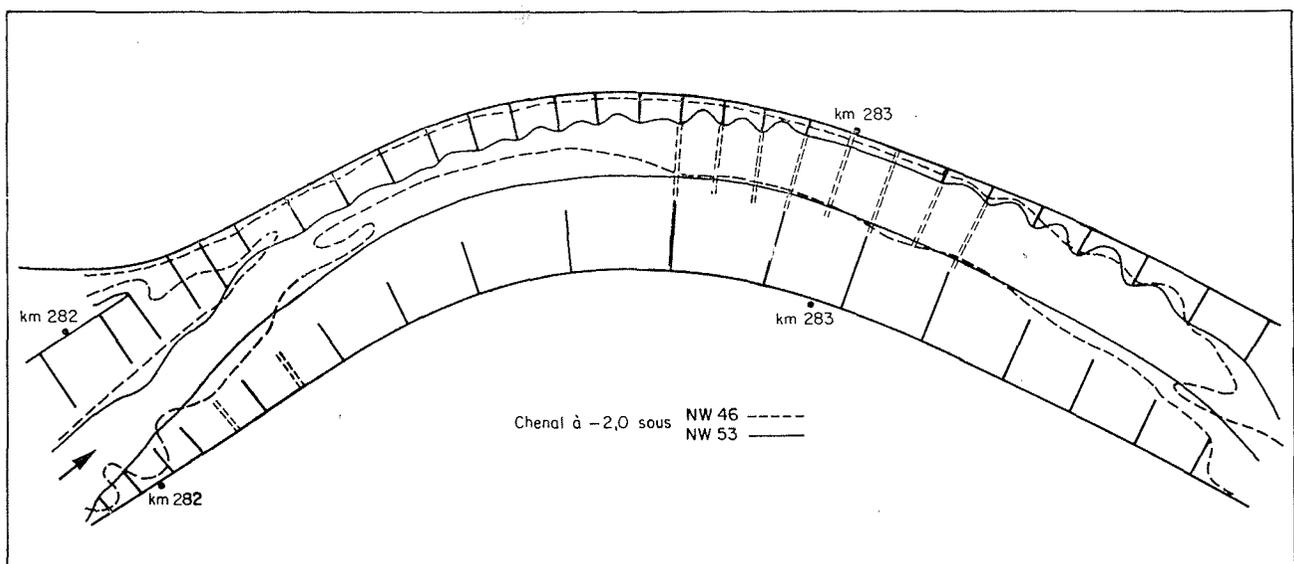


FIG. 8

Courbe de la Ferme d'Altenheim. Modification du tracé du chenal.

s'était formé un affouillement très important (8 m sous le niveau d'étiage) menaçant sa stabilité. On observa que le tracé des ouvrages de régularisation avait conduit à coller le talweg contre la berge concave sur presque toute la longueur de la courbe, alors que la position la plus stable du chenal, observée avant la régularisation, correspondait à un passage progressif du chenal de l'intérieur vers l'extérieur dans la moitié amont de la courbe, fait d'ailleurs confirmé par des études théoriques (Wittmann et Boss). Le profil obtenu comportait donc un che-

nal assez étroit tandis qu'un écoulement important subsistait du côté intérieur dans la moitié amont de la courbe. Il fut décidé de rectifier la position du chenal en prolongeant les épis extérieurs et en complétant leur système par une série de seuils de fond, de façon à maintenir au début de la courbe le chenal éloigné de la rive externe; simultanément, les épis côté interne furent raccourcis par dérasement. La figure 8 montre la situation en 1946 et le résultat favorable déjà obtenu en 1953; par la suite, la largeur du chenal s'améliora sensiblement.

ÉTUDES CONCERNANT L'ÉROSION DU LIT DU RHIN

Les résultats obtenus restaient cependant menacés par la permanence de l'érosion. Celle-ci continuait, comme avant la régularisation, à progresser en s'étalant vers l'aval, son intensité diminuant peu à peu dans le secteur amont en même temps que la pente. La figure 9 donne,

à titre d'exemple, la variation du plan d'eau d'étiage (débit 540 m³/s à Bâle) à quelques échelles caractéristiques. On observa bien au droit de presque toutes les échelles une surélévation passagère du niveau d'étiage de l'ordre de grandeur de 20 à 30 cm pendant les premiers tra-

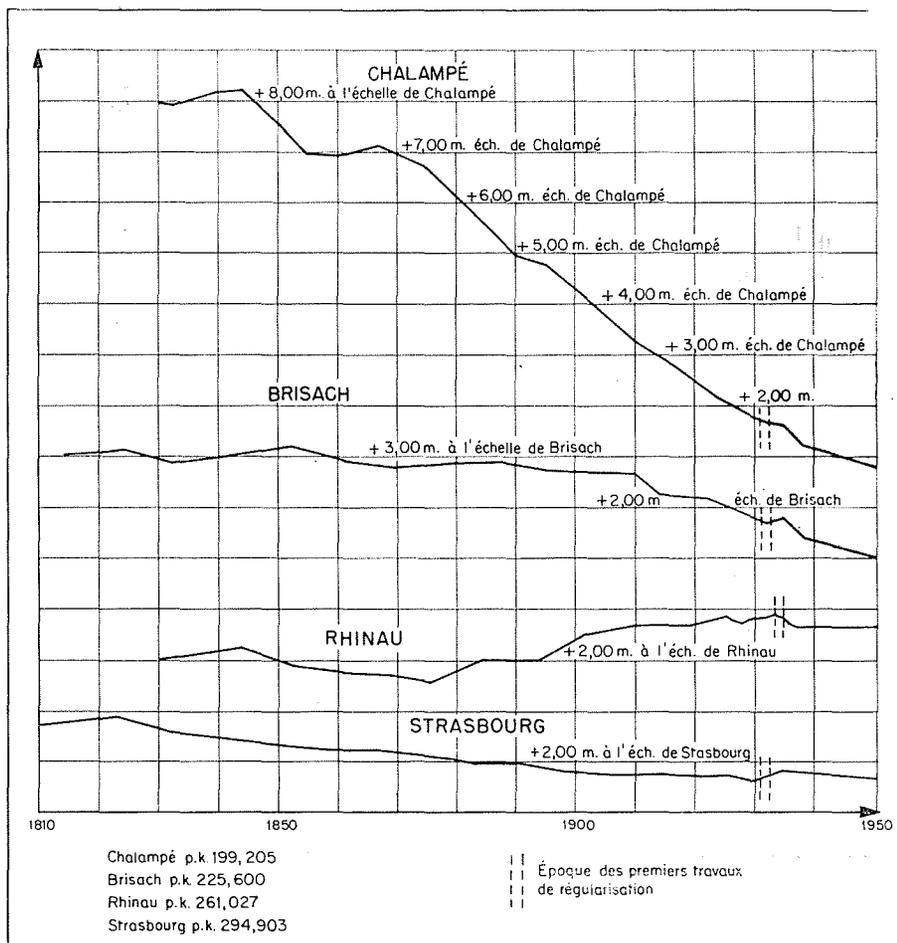


FIG. 9

Variations du plan d'eau
540 m³/s à Bâle
à quelques
échelles caractéristiques
de 1810 à 1950

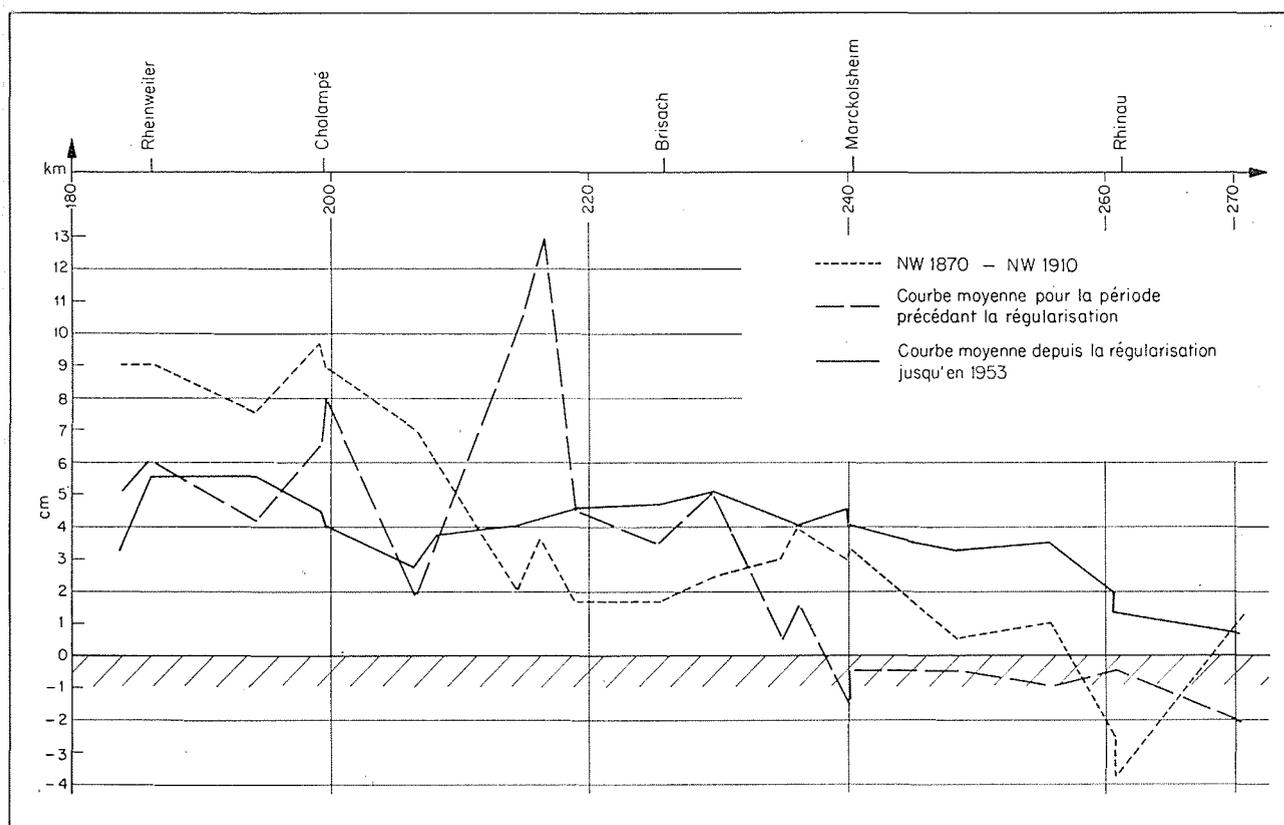


FIG. 10

Courbes représentant les approfondissements moyens en cm/an aux différentes échelles du Rhin à l'aval de Kembs (NW = étiage conventionnel).

vaux de régularisation, mais elle disparut au bout de 3 à 5 ans, dès que la formation du chenal entre les épis eut rétabli les sections d'écoulement normales. La construction des ouvrages s'étant d'ailleurs poursuivie jusqu'à ces dernières années, les observations faites depuis le début de la régularisation n'ont pu porter que sur des niveaux résultant de profils en travers sans cesse modifiés artificiellement. Ce n'est que maintenant qu'on peut espérer observer exactement l'allure de l'évolution naturelle. Encore celle-ci est-elle modifiée depuis 1952 par les mises en service successives des biefs du Canal d'Alsace.

Des approfondissements observés, on peut cependant conclure que la régularisation ne paraît pas avoir atténué sensiblement la cadence de l'érosion. Celle-ci atteint maintenant la région de Rhinau, qui était autrefois un secteur d'alluvionnement. La figure 10 résume cette évolution, en donnant les approfondissements moyens annuels aux différentes échelles entre 1870 et 1910, ainsi que dans les périodes avant et depuis la régularisation jusqu'en 1953. Les surfaces com-

prises entre l'axe des abscisses et les différentes courbes donnent une idée du volume moyen annuel de l'érosion pour chaque période, et n'en font aucunement apparaître une diminution.

Ce volume moyen annuel avait été chiffré, pour la période de 1870 à 1910, à 600 000 m³; le volume moyen annuel déposé dans le secteur d'alluvionnement entre Schoenau et Rhinau était de 50 000 m³, soit, même si l'on tient compte du coefficient d'usure, une faible partie des matériaux charriés. Le reste fournissait le débit solide du secteur situé à l'aval, provisoirement en équilibre jusqu'au p.k. 340. De 1923 à 1932, la perte annuelle semble être restée du même ordre, la précision des calculs faits sur cette courte période étant naturellement moins bonne. Puis des calculs relatifs à la période 1932 à 1953 conduisent à un volume moyen annuel d'érosion de l'ordre de 450 000 m³, mais leur précision également relative et le fait qu'ils portent sur une période de construction des ouvrages ne permettent pas d'en tirer des conclusions nettes infirmant celles ci-dessus.

Ces observations rejoignent d'ailleurs les con-

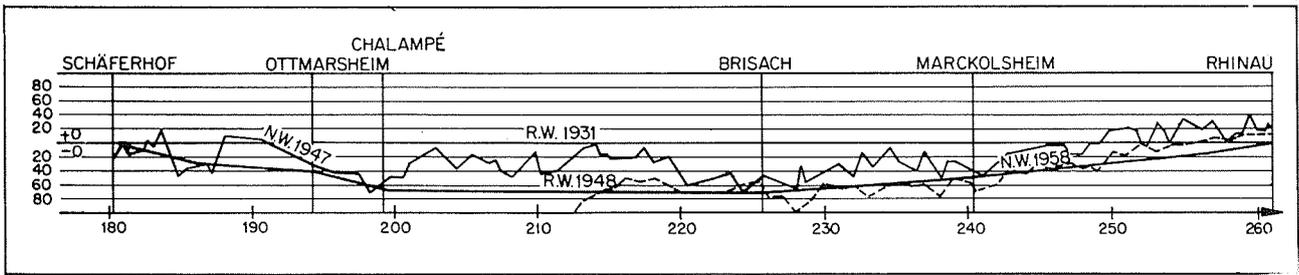


FIG. 11
Fixation du « plan d'eau de régularisation 1948 » à l'aval de Kembs.

clusions d'une étude de 1937 du Laboratoire d'Hydraulique de Karlsruhe : les épis seuls ne permettent pas d'arrêter l'érosion, et le rétrécissement progressif du lit mineur entre ceux-ci risque même de l'augmenter ; des essais sur modèle du secteur de Brisach ont permis de comparer les volumes emportés sur une période de 30 ans, avec et sans épis. Si pendant la première décade les épis ralentissent l'érosion, on la retrouve sensiblement pendant la deuxième, et pendant la troisième le volume emporté est plus grand qu'en l'absence d'épis.

Si les cotes des épis restent invariables, les

sections d'écoulement deviennent en effet de plus en plus profondes à mesure que le fond du lit s'abaisse, un débit de plus en plus grand peut être concentré entre les ouvrages, la force d'entraînement augmente; cette augmentation a été estimée à 12 à 14 % dans le cas d'un approfondissement de 1 m, pour des débits de 1 000 à 1 500 m³/s, et dans l'hypothèse à vrai dire défavorable d'un lit mineur bordé de talus continus. L'état d'équilibre du fond ne pourrait donc être atteint qu'après un abaissement inadmissible, au moment où la résistance à l'écoulement provoquée par les épis prolongés très

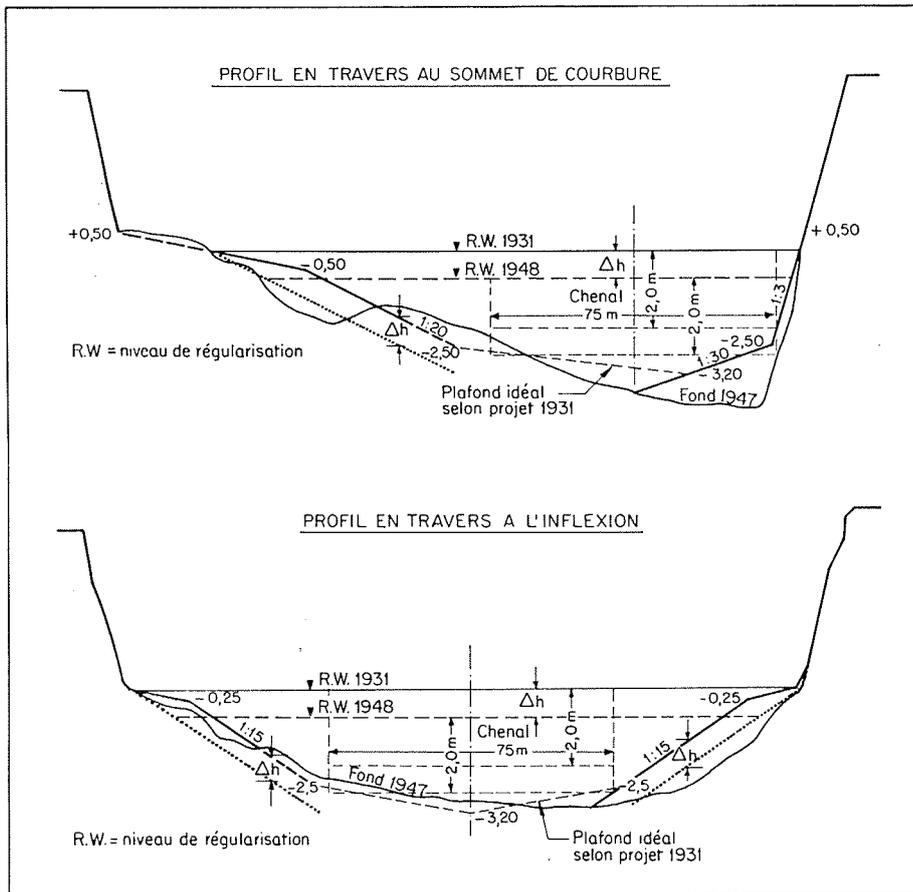


FIG. 12
Adaptation du profil en long des épis au nouveau plan d'eau de régularisation.
En haut : profil en travers au sommet de courbure
En bas : profil en travers à l'inflexion.

en avant dans le lit du fleuve compenserait l'énergie du courant; ces épis provoqueraient alors les mêmes difficultés que celles décrites plus loin pour les seuils de fond.

Cet approfondissement continu mettrait d'ailleurs en danger la stabilité des épis. Ceux-ci durent souvent être construits sur des fonds relativement élevés, et non pas fondés plus profond. L'érosion rendant possible en particulier l'affouillement des têtes d'épis, celles-ci devraient être périodiquement rechargées. Afin d'éviter l'accélération de l'érosion, on a déjà été conduit, en 1948, à fixer pour les réparations et nouvelles constructions d'épis un niveau de régularisation adapté à l'abaissement du fond. La figure 11 en donne le profil en long; il avait été choisi plus bas que le niveau d'étiage 1947 pour tenir compte de l'érosion future, mais la figure montre que le niveau d'étiage 1958 lui correspond déjà sensiblement. La figure 12 montre l'adaptation du profil des ouvrages à réparer à ce nouveau R.W. : les têtes seules ayant été abîmées en général, on a conservé le couronnement primitif en reculant simplement les têtes de façon à traduire sur les talus des épis l'abaissement du niveau d'étiage.

Une telle mesure est cependant essentiellement provisoire. La poursuite de l'érosion conduirait naturellement à déraser périodiquement la partie supérieure des épis et à prolonger leur base, soit à les abaisser dans la mesure même de l'érosion. Mais l'épaisseur des épis est souvent de l'ordre de 2 m; même en supposant qu'ils soient entièrement construits de matériaux stables, on en arriverait après deux abaissements successifs de 60 à 80 cm (diamètre d'un gabion), à échéance évidemment lointaine, à ne laisser sur le dessus de l'épi qu'une épaisseur de 40 à 50 cm de moellons, tout à fait insuffisante pour protéger le gravier sous-jacent. D'autre part, on arriverait à prolonger exagérément les talus amont et aval des épis. Au bout de quelques adaptations, on pourrait donc craindre d'avoir, dans quelques dizaines d'années, à reprendre entièrement un certain nombre d'ouvrages.

L'importance de ces frais d'entretien et de remaniement apparaît d'autant plus que l'érosion semble devoir se poursuivre longtemps. Le Service Fédéral des Eaux à Berne a donné à ce sujet à la « Commission des Travaux » les résultats d'études très approfondies auxquelles il a procédé après la guerre en liaison avec le Laboratoire d'Hydraulique de l'Ecole Polytechnique de Zürich. L'application au Rhin des remarquables travaux de ce Laboratoire relatifs au régime du débit solide des rivières a permis de prévoir l'allure des phénomènes : dans l'hypothèse de l'état antérieur à la régularisation, l'étude de la condition d'absence de charriage

d'alluvions (pour des débits jusqu'à 5 000 m³/s) menait à conclure que ce n'était qu'aux environs du km 430 (Brisach est au km 225,600) que le diamètre déterminant des matériaux du fond du lit coïncidait sensiblement avec celui correspondant à l'état d'équilibre avec un débit solide nul. Le débit solide arrivant de Bâle étant très faible et les pentes actuelles étant, compte tenu des dimensions des graviers, sensiblement plus fortes que celles correspondant à l'équilibre sans charriage d'alluvions, on était donc amené à prévoir un approfondissement très important jusque dans le secteur du km 430, avant que l'équilibre ne soit atteint à très longue échéance. Ceci même en tenant compte de ce que, au fur et à mesure de l'avancement de l'érosion, il se

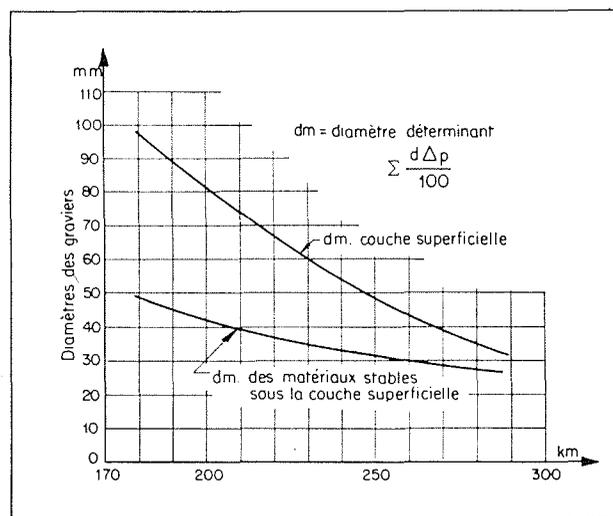


FIG. 13

Analyses de 1946 des matériaux des bancs de gravier et du fond du lit (S.F.E.)

formerait par sélection une couche superficielle de matériaux plus grossiers jouant le rôle de couche protectrice.

Les analyses des matériaux du fond du lit faites en 1946 à la demande du Service Fédéral des Eaux avaient donné les caractéristiques de la couche superficielle existante (fig. 13). Dans le secteur d'érosion les matériaux formaient en général un agglomérat très dur. Cependant, on peut observer que les matériaux les plus gros de la couche superficielle n'étant pas stables pour les grandes crues, ils doivent être entraînés à leur tour, la couche superficielle étant continuellement détruite par l'érosion et devant se reformer à partir des matériaux du fond; et les analyses de gravier faites en 1946 jusqu'à une profondeur de 2 m montraient que souvent la finesse des alluvions augmentait avec la profon-

deur, au moins jusqu'à 1 m. L'érosion pourrait donc être passagèrement accentuée en atteignant ces couches.

Des études du Laboratoire de Zürich on pouvait donc conclure qu'une fixation du fond du lit limitée à l'actuel secteur d'érosion aurait reporté en aval l'approfondissement, et qu'avec le temps on serait amené à se préoccuper du

comportement du Rhin jusqu'à un secteur estimé au p.k. 430 environ.

Bien que l'érosion fût limitée à quelques centimètres par an, ses conséquences à long terme apparaissent donc très importantes, et nous analyserons dans ce qui suit ce qui fut tenté pour y remédier.

RECHERCHES SUR LES SEUILS DE FOND

Il s'était confirmé dès 1936 que le système d'épis seul ne pourrait pas arrêter l'érosion, même en prévoyant un élargissement du lit mineur qui, du reste, n'aurait plus permis d'obtenir dans le chenal les profondeurs désirées. Il fallait donc augmenter la résistance du fond du lit. Une protection continue du fond du lit par un revêtement en gros matériaux paraissait conduire, vu la dimension nécessaire de ceux-ci, à des dépenses trop élevées; elle aurait d'autre part supprimé la possibilité de jeter l'ancre pour des bateaux avalants. La solution de groupes successifs de seuils de fond paraissait préférable, et son étude fut poursuivie activement. Avec l'aide du Laboratoire Hydraulique de Karlsruhe, la « Direction des Travaux » (W.S.D. Freiburg) fit une analyse extrêmement complète et remarquable de la question, résumée dans deux rapports de 1937 et 1942 du Laboratoire, et dans un rapport d'ensemble de la W.S.D. Freiburg (M. Schneider). Nous donnerons ci-dessous les résultats de ces études.

Les observations faites dans la nature sur les premiers seuils de fond (construits sur une partie de leur longueur seulement) montrèrent qu'en cas de charriage important les seuils de fond provoquent le comblement des mouilles profondes et l'élargissement du chenal, et même l'engravement de leur propre couronnement; par contre, pour un débit solide faible ou nul, ce qui est le cas à considérer pour les seuils de fond destinés à arrêter l'érosion, et correspond déjà à la situation dans la zone amont du secteur d'érosion, on observa la formation de mouilles profondes à l'aval de chaque seuil, d'où des irrégularités marquées du plan d'eau.

Des essais sur modèle réduit exécutés à Karlsruhe confirmèrent que la formation de ces mouilles est inévitable, mais que leur profondeur diminue si l'on réduit l'espacement des seuils. On nota également que les seuils placés aux points d'inflexion du chenal donnaient des

mouilles plus profondes que ceux situés aux sommets de courbure. Concernant le régime du débit solide, les essais montrèrent qu'avec des seuils isolés, les mouilles sont très profondes et le volume de gravier entraîné encore important au bout de 30 ans. Par contre, des groupes de seuils, en répartissant la chute sur des seuils successifs rapprochés, donnent des mouilles plus limitées; s'il est pendant la première décennie plus fort qu'en l'absence de seuils, le volume entraîné diminue ensuite de telle sorte qu'on peut affirmer qu'avec le temps il deviendrait négligeable. On observa enfin que des seuils de fond à couronnement horizontal donnaient un fond du lit plus régulier et des mouilles moins profondes que les seuils à couronnement incliné vers le chenal tels que prévus au projet (fig.12); ceux-ci, en concentrant trop le courant au milieu du fleuve, conduisent à l'aval des seuils à la création d'un chenal profond mais étroit et peu favorable à la navigation.

Les observations du plan d'eau sur modèle montrèrent que celui-ci ne se modifie plus guère au bout d'un temps relativement court, même si la configuration du fond entre les seuils n'est pas encore définitive. Les essais montraient donc la possibilité d'arrêter l'érosion et de maintenir le plan d'eau à une cote déterminée; mais il restait à vérifier si l'augmentation de la vitesse au-dessus des seuils et la contre-pente du plan d'eau au passage dans les mouilles situées à l'aval ne créaient pas des conditions difficiles pour la navigation. Des mesures très délicates (à effectuer au centimètre près) du plan d'eau du Rhin au-dessus de deux amorces de seuils avaient mis en évidence le net abaissement du plan d'eau (jusqu'à 20 cm) sur leur couronnement.

Des essais systématiques, sur modèle, de différentes dispositions de groupes de seuils pour des débits largement variables, ont permis d'établir une méthode de calcul du profil en long du plan d'eau. On nota dans les mouilles des tourbillons

et courants de retour importants de positions sans cesse variables; le débit dans le sens du courant était donc dans ces mouilles supérieur à celui mesuré sur les seuils, et les vitesses déterminantes pour la cote du plan d'eau plus fortes que celles qu'aurait donné un calcul admettant un courant réparti sur la totalité de la surface de la mouille. On fut ainsi conduit à définir un « plafond idéal » limitant la « partie utile » du profil en travers de la mouille, soit celle qu'il faut considérer pour qu'un calcul faisant abstraction des courants de retour conduise à retrouver les cotes du plan d'eau observé sur modèle. Dans la limite des débits étudiés, les profondeurs « utiles » appurent peu variables avec le débit, si bien qu'on put les considérer comme ne dépendant que des formes des mouilles réelles, et établir des lois de leur variation en fonction de la profondeur et de la longueur de celles-ci. La W.S.D. Freiburg put alors procéder à des calculs complets des plans d'eau dans des cas variés, calculs dont les résultats furent confirmés d'une manière très satisfaisante par les observations sur modèle, et par les quelques observations qui furent possibles dans la nature.

La W.S.D. Freiburg était ainsi armée pour étudier par le calcul les dispositions les plus favorables des seuils de fond et leur répercussion sur la navigation. Elle examina d'abord les variations de la résistance à l'avancement d'un automoteur de 500 t et 55 m de longueur (dimensions courantes de l'époque) lors du passage au-dessus de l'amorce de seuil isolée construite au p.k. 182,855 du Rhin, en se basant sur le plan d'eau réel relevé au-dessus. Pour le calcul des variations des résistances de frottement et de forme, l'application des formules classiques dut être soigneusement adaptée aux fortes variations locales de la vitesse. Mais l'élément prépondérant était la résistance de pente. En secteur courant, celle-ci est donnée par la composante du poids total du bateau sur une parallèle au plan d'eau $R_i = P \sin \alpha$.

Dans la zone du seuil, on avait par contre des variations très sensibles de la pente superficielle sur des distances relativement courtes par rapport à la longueur du bateau. Il fallut donc déterminer, par des calculs longs et pénibles, et possibles seulement à condition de supposer que la ligne d'eau n'était pas affectée par la présence du bateau, l'inclinaison réelle prise par celui-ci sur l'horizontale; c'est cette valeur de α qu'il faut considérer pour le calcul de la résistance de pente pour chaque position du bateau. La figure 14 donne les courbes établies par la W.S.D. Freiburg pour les cas d'un bateau immobile par rapport à la rive, ou remontant par rapport à elle à une vitesse de 1 m/s ou de

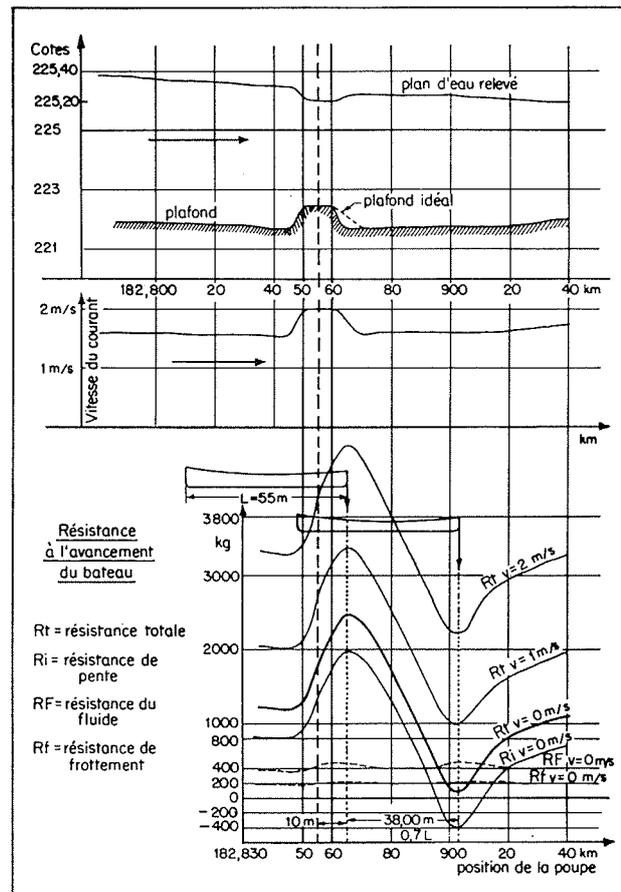


FIG. 14

Passage sur le seuil de fond p.k. 182,855 du Rhin d'un automoteur de 500 tonnes (longueur 55 m). Calculs de la W.S.D. Freiburg sur les résistances à l'avancement.

2 m/s. La valeur de la résistance donnée en un point s'entend la poupe du bateau (hélice) étant placée en ce point.

Alors que la résistance du fluide (frottement + forme) varie relativement peu au passage du seuil, les vitesses élevées n'intéressant jamais qu'une faible partie du bateau, les fortes irrégularités de la surface du plan d'eau conduisent à de fortes variations de la résistance de pente, qui, pour le bateau immobile, atteint environ le triple de sa valeur normale lorsque la poupe du bateau se trouve à 10 m à l'aval de l'axe du seuil, soit dans la zone de la dépression du plan d'eau. La distance entre les deux positions donnant les valeurs extrêmes de la résistance est de 70 % de la longueur du bateau.

Pour le bateau immobile ($v = 0$), le maximum de la résistance totale dépasse le double de sa valeur normale, son minimum étant à peine supérieur à 0. Encore le seuil de fond étudié, en saillie de 0,75 m seulement au-dessus du fond, et

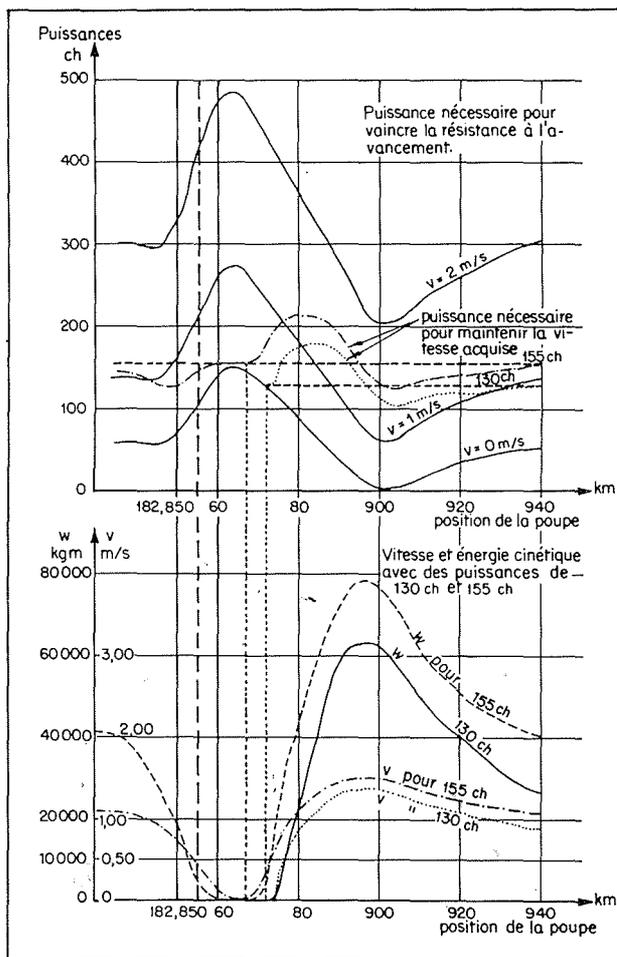


FIG. 15

Passage sur le seuil de fond p.k. 182,855.
Calculs de la W.S.D. Freiburg.

sans mouille appréciable encore formée à l'aval, n'était-il qu'un ouvrage modeste.

En considérant ensuite la puissance nécessaire sur l'arbre de l'hélice (compte tenu du rendement de celle-ci) pour équilibrer aux différentes vitesses la résistance totale à l'avancement : $P = Rt \times \text{vitesse}$ par rapport à l'eau/rendement, la W.S.D. Freiburg établit les courbes de la figure 15. Elles ont la même allure que celles de la résistance totale. Mais du fait de la vitesse plus forte dans la zone de résistance maxima, le rapport entre les valeurs minima et maxima est encore accentué. Pour le bateau immobile par rapport à la rive, la puissance maxima est environ triple de la valeur normale.

Restait une dernière question à examiner : les valeurs maxima (résistance et puissance) n'intervenant que sur quelques mètres de longueur, les puissances calculées ne pouvaient-elles être diminuées pour tenir compte de l'énergie cinétique que possède le bateau en abordant

l'obstacle de courte longueur. La W.S.D. Freiburg a établi (fig. 15), pour les deux cas du bateau équipé d'une puissance de 130 ch, et de 155 ch, les courbes représentant les variations de la vitesse et de l'énergie cinétique le long du parcours. Elle a établi également les courbes donnant, en chaque point, la puissance qui serait nécessaire pour conserver la vitesse acquise. Ces courbes montrent que l'énergie cinétique acquise est rapidement absorbée; et dans tous les cas soumis au calcul, elle s'est avérée insuffisante pour permettre au bateau d'atteindre la position de plus forte résistance. Il ne peut l'atteindre et la franchir que si sa puissance est suffisante pour vaincre seule en tout point la résistance à l'avancement; et il ne franchira alors la zone critique qu'à vitesse très réduite, grâce à l'utilisation continue de la puissance totale de ses machines.

La W.S.D. Freiburg avait ainsi mis en évidence l'importance à attacher à ce problème lors de la construction des seuils de fond. Après des études très complexes, et compte tenu de ce qu'il fallait aménager, entre les groupes de seuils, des secteurs libres permettant les manœuvres d'ancrage des bateaux, la disposition comportant, par km, deux groupes de 5 seuils de fond espacés de 30 m, lui apparut comme la plus favorable. Elle donnait une répartition à peu près uniforme des profondeurs, vitesses et chutes sur les 5 seuils d'un groupe. En tenant compte des profondeurs des mouilles naturelles avant la régularisation, on avait compté sur des mouilles de 5 m de profondeur entre groupes de seuils, profondeur limitée à 3 m entre seuils d'un groupe (fig. 16).

La profondeur obtenue sur les groupes de seuils était, selon le calcul, de 2,25 m à 2,50 m pour le débit de 525 m³/s (correspondant à l'étiage 540 m³/s à Bâle), soit laissant une certaine marge par rapport à la profondeur de 2 m constituant le but de la régularisation.

L'étude des résistances à l'avancement, reprise pour les différentes dispositions possibles des groupes de seuils, confirma que celle retenue était la plus favorable. Elle mit notamment en évidence que la distance optimum entre seuils serait de 0,7 de la longueur du bateau considéré afin de dérouter les pointes de résistance (voir les résultats relatifs à un seuil isolé et la figure 14). La distance de 30 m entre seuils apparut donc bien préférable pour les bateaux courts à celle de 60 m qui avait été également envisagée. Pour les bateaux plus longs, moins sensibles aux variations locales de la pente du plan d'eau, les résultats sont nécessairement plus favorables. La figure 17 montre bien l'amélioration donnée par la disposition retenue en ce qui concerne la résistance à l'avancement d'un automoteur de 55 m. Des

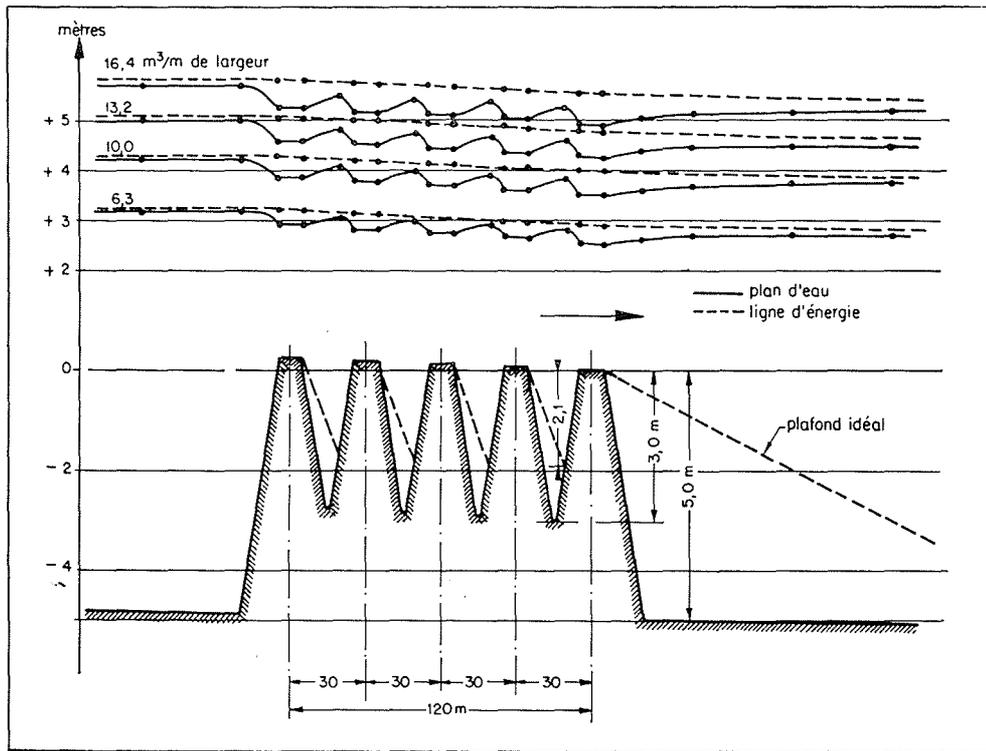


FIG. 16

Ecoulement sur un groupe de seuils de fond (2 groupes par km). Plans d'eau d'après les calculs de la W.S.D. Freiburg.

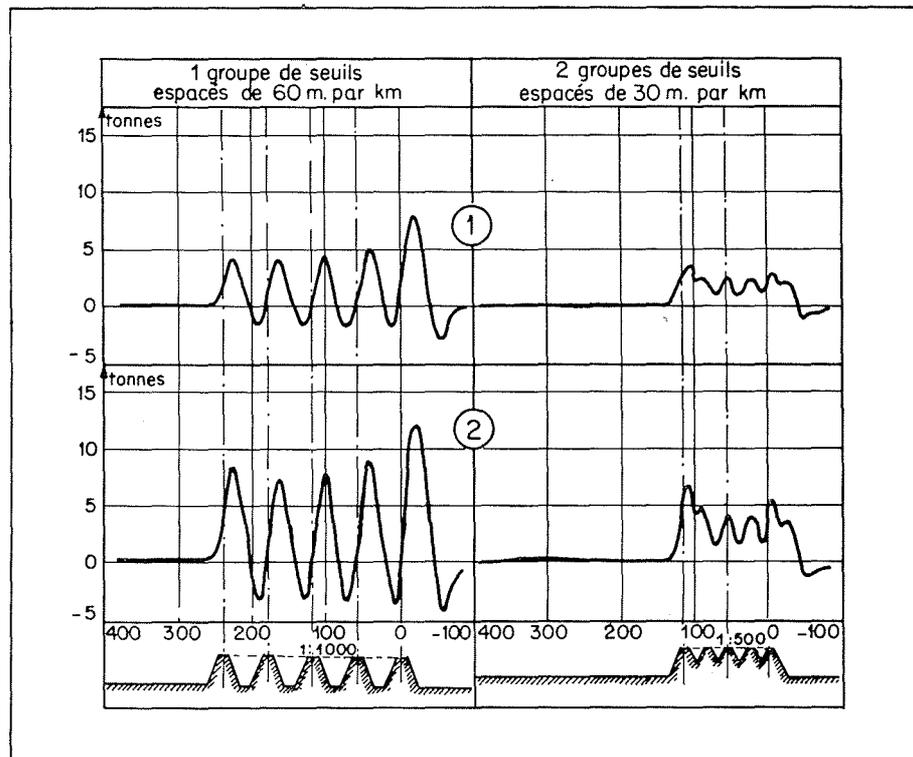


FIG. 17

Variations de la résistance à l'avancement d'un bateau au passage d'un groupe de seuils de fond (automoteur de 500 tonnes). Calculs de la W.S.D. Freiburg.

- (1) Débit 6,3 m³/s par m de largeur. Enfoncement du bateau 1,50 m.
- (2) Débit 10 m³/s par m de largeur. Enfoncement du bateau 2,10 m.

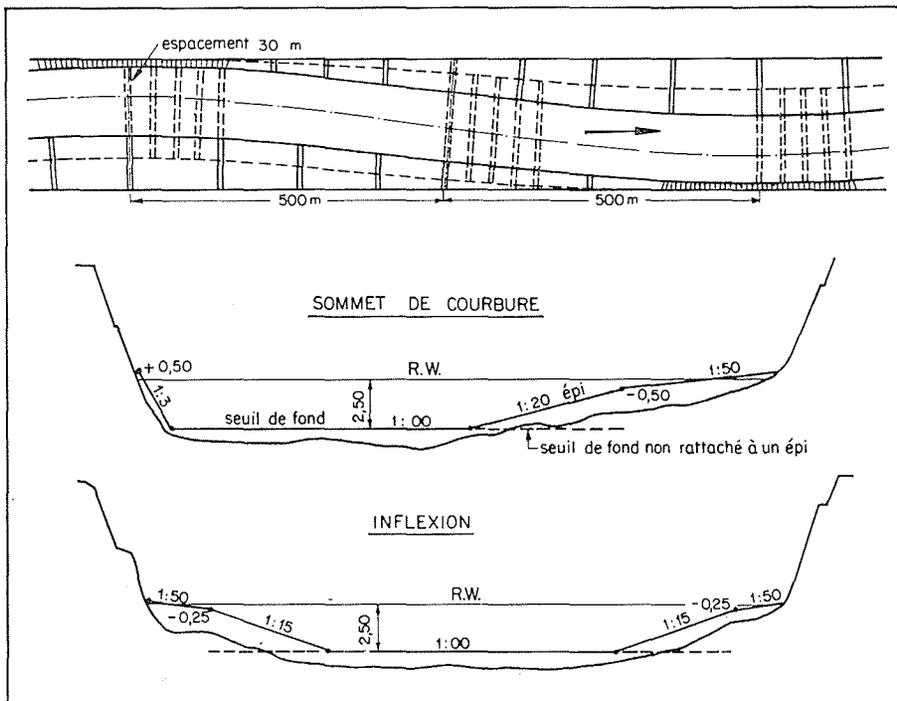


FIG. 18

Disposition des seuils de fond envisagée pour le secteur d'érosion du Haut-Rhin.

essais sur modèle effectués à Karlsruhe avec des modèles de remorqueur à roues (80 m), de chaland de 1 350 t et d'automoteur de 500 t, confirmèrent bien que la disposition envisagée était la meilleure.

Ainsi les études très longues et délicates menées à bien par la W.S.D. Freiburg et le Laboratoire de Karlsruhe avaient permis de mettre au point pour les seuils de fond dans le secteur d'érosion (pente 1 ‰), une solution schématisée par la figure 18. Elle devait permettre de stabiliser le plan d'eau et de limiter l'érosion, sans que les seuils de fond ne soient eux-mêmes menacés par les mouilles formées à l'aval : on évitait l'apparition de l'écoulement torrentiel avec veine plongeante surmontée d'un rouleau. Les inconvénients pour la navigation inévitables avec des seuils de fond, étaient réduits dans toute la mesure du possible, une profondeur de l'ordre de 2,50 m subsistant sur les seuils en étiage, et les variations de la résistance à l'avancement étant fortement atténuées.

La construction systématique des seuils de fond comportait cependant encore des risques assez grands. Pour ne pas augmenter le volume annuel d'érosion pendant la construction et éviter ainsi un charriage excessif, il fallait compter sur une cadence de construction de 3 à 4 km par an, soit un délai de l'ordre de 15 ans pour le secteur Istein-Brisach. Il était nécessaire d'établir les seuils à une cote élevée (2,50 m sous l'étiage), et leur construction devait se faire

avec une précision difficile à atteindre, même en basses eaux. Leur construction dans le chenal avec une navigation active aurait posé des problèmes très délicats. Par ailleurs, la moindre erreur d'exécution aurait eu des conséquences importantes sur le plan d'eau et la profondeur au-dessus des seuils, et les dimensions des moellons et gabions à utiliser étaient telles que tout défaut dans leur position risquait encore de réduire dangereusement cette profondeur. Même en prévoyant une surveillance constante des ouvrages, la marge paraissait assez juste, surtout en tenant compte des risques de détérioration des ouvrages par les ancrs : on avait bien prévu un espace libre de l'ordre de 400 m entre groupes de seuils, mais sur le gravier très compact du secteur d'érosion les ancrs mordent très difficilement, et dérapent parfois sur de grandes distances. S'accrochant dans les matériaux d'un seuil, une ancre y serait nécessairement perdue, et extrêmement difficile à repérer et à enlever ; elle constituerait pour la navigation un obstacle très dangereux.

De toute façon, les conditions de navigation auraient été sensiblement aggravées. Sur les groupes de seuils se seraient formées des concentrations de pente de 0,50 m sur 180 m de longueur, ce qui représente une pente de 2,8 ‰ alors que des pentes de 2,5 à 3 ‰ sont considérées sur d'autres fleuves comme des entraves sérieuses à la navigation. Pour les franchir, les automoteurs auraient dû être équipés de puis-

sances un peu supérieures à celles nécessaires dans l'état d'avant la régularisation; les calculs donnaient, pour un automoteur de 500 t, 1,3 ch par tonne de chargement environ. Or il était difficile de songer à modifier la puissance des automoteurs uniquement pour le court secteur du Haut-Rhin; il fallait alors envisager de les faire naviguer avec un chargement sensiblement réduit, soit dans des conditions antiéconomiques, ou de les intégrer à des convois remorqués pour ce secteur difficile. Le développement considérable du nombre des automoteurs rendait cette solution impraticable.

Pour les convois, les circonstances auraient été plus favorables, à condition qu'un seul élément du convoi se trouve à la fois au-dessus d'un groupe de seuils. Mais la navigation avalante aurait été rendue plus délicate du fait des variations rapides de la vitesse du courant: à l'arrivée de l'étrave dans la zone de faible cou-

rant à l'aval de chaque groupe de seuils, zone troublée de tourbillons et courants transversaux, il aurait fallu de la part des bateliers une adresse et une attention accrues, la proue ayant tendance à dévier de sa route au moment même où le ralentissement aurait diminué l'efficacité du gouvernail. Ces points délicats se seraient retrouvés tous les 500 m, avec croisements fréquents de montants les franchissant à vitesse réduite.

Toutes ces difficultés paraissaient difficilement compatibles avec un développement de la navigation dans des conditions économiques. Il fallut donc se résoudre à renoncer à la construction de seuils de fond destinés à arrêter l'érosion. Seules quelques amorces de seuils de fond situés à une grande profondeur, ne gênant pas la navigation mais impuissants à arrêter l'érosion, furent construites et maintenues pour obtenir un élargissement du chenal en quelques points singuliers.

ESSAIS DE FIXATION DU FOND DU LIT PAR UN REVÊTEMENT

La construction de seuils de fond n'ayant pu être poursuivie, et cette question préoccupant vivement la « Commission des Travaux », les délégués suisses et le Service Fédéral des Eaux à Berne furent conduits à réexaminer après 1945 la possibilité d'une fixation du fond par un revêtement en gros matériaux. Un procédé analogue avait été appliqué avec succès pour fixer le fond du lit de l'Aar près de Thoun: il consistait à augmenter le diamètre moyen du gravier naturel en répandant de manière régulière sur le fond de gros blocs.

Cependant, il apparut que sur le Rhin il était préférable, eu égard à la navigation, d'utiliser des moellons moins gros mais recouvrant le lit d'une manière continue. Pour mettre au point cette solution, le Service Fédéral des Eaux confia au Laboratoire Hydraulique de Zürich l'exécution d'essais sur modèle (voir notamment le rapport de MM. Oesterhaus et Müller au 17^e Congrès International de Navigation). Ceux-ci portèrent d'abord sur le comportement en canal à deux dimensions reproduit à l'échelle de 1/50, pour des pentes de 1 ‰ et 1,2 ‰, de quatre types de revêtement :

— Un revêtement complet avec de grosses pierres rondes de diamètre uniforme, qui se révéla stable pour une pente de 1 ‰ et une crue de 5 000 m³/s à condition d'utiliser des pierres d'un diamètre de 15 à 18 cm. l'épaisseur de la couche devant atteindre deux fois et demie à trois fois ce diamètre. Avec des

pierres concassées, on obtint une résistance à l'érosion un peu supérieure.

- De gros blocs isolés répartis sur le fond du lit: pour la même pente et la même crue, la distance des blocs devait être de 1,50 m et leur poids de 400 à 600 kg.
- De gros blocs isolés avec revêtement du lit entre eux: solution intermédiaire entre les précédentes, qui se révéla stable pour une pente de 1,2 ‰ et une crue exceptionnelle de 5 700 m³/s, à condition de disposer des blocs de 400 à 600 kg à espacement de 1,50 m,

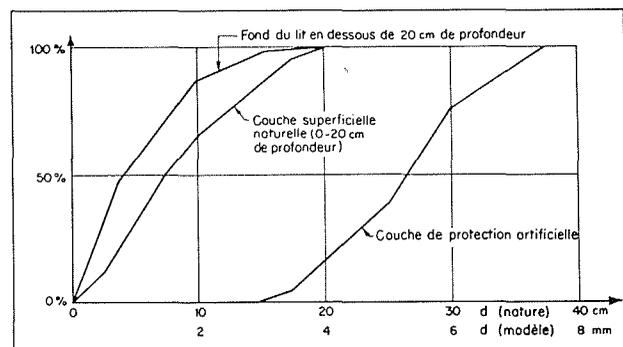


FIG. 19

Etude sur la fixation du fond du lit. Courbes granulométriques des alluvions utilisées pour la reproduction du lit du Rhin et du revêtement. (Laboratoire de Zürich).

avec revêtement entre eux d'épaisseur 20 cm constitué de moellons de 16 à 18 cm de diamètre.

- Un revêtement complet permettant de mieux utiliser les produits de carrière par mélange de pierres de différents diamètres.

Cette dernière solution apparut comme la plus pratique et la plus économique; une série d'essais conduisit à choisir un mélange de pierres de diamètre moyen variant de 15 à 38 cm (fig. 19), l'épaisseur de la couche étant de 35 cm. Cette solution donnait de bons résultats pour une pente de 1,2 ‰ et un débit de 5 700 m³/s, et résistait même à des crues extrêmes de 7 500 m³/s. Elle correspondait en même temps à une rugosité suffisante pour obtenir une bonne profondeur d'eau en période d'étiage.

Elle fut alors soumise à des essais à trois dimensions permettant d'étudier les majorations locales des sollicitations, et notamment l'influence des épis et des courbes. La fixation du lit paraissant particulièrement urgente sur un secteur de quelques kilomètres à l'aval du débouché dans le Rhin du canal de fuite du bief de Kembs, afin d'arrêter l'abaissement du plan d'eau sur le seuil des écluses, on choisit pour le modèle un tronçon de 6,7 km du Rhin commençant à 300 m en aval de la barre d'Istein, soit au km 178,300. La couverture du fond était réalisée du km 180,300 (débouché du canal de fuite) au km 182,250, non pas sur toute la largeur du lit, mais sur une bande située entre les épis, et débordant de 10 m les alignements des pieds des talus des épis sur une partie du secteur. Sur le tronçon à l'amont de cette couverture étaient disposés des blocs isolés destinés à arrêter le charriage d'alluvions, puisqu'il s'agissait surtout de contrôler la tenue de la couche de protection en l'absence de débit solide.

Des essais correspondant à des crues extrêmement fortes et de longue durée, dépassant largement les crues réelles (ex. 6 000 m³/s pendant 35 heures alors que le débit maximum connu est de 5 700 m³/s pendant une heure) et correspondant donc à la sommation d'une très longue période, montrèrent certains affouillements, de 0,50 m environ de profondeur, entre les épis. Par ailleurs, on nota un abaissement du lit à l'aval de la couche de protection (sur les premiers 1 400 m, moyenne de 0,70 m); l'affouillement le plus profond (2,20 m en dessous du niveau primitif du lit) ayant été constaté à 150 m environ en aval de l'extrémité de cette couche. Encore faut-il observer que le plan d'eau à l'extrémité aval du modèle était fixe pendant les essais, ce qui ne correspond pas au processus naturel suivant lequel il s'abaisse à mesure de l'érosion, et diminuait les abaissements du lit. D'ailleurs l'érosion devant nécessairement se poursuivre à l'aval de l'extrémité d'un tronçon protégé, on

serait de toute façon conduit à envisager, à longue échéance, le prolongement de la couche de protection vers l'aval.

Le Laboratoire de Zürich étudia également l'influence des détériorations pouvant être causées par les ancres; elles furent représentées sur le modèle par des sillons créés artificiellement en enlevant la couche de protection, en quatre endroits différents, sur une bande de 150 m de longueur et 2 m de largeur. Ni une crue de 4 200 m³/s pendant 35 heures (réalité), ni l'écoulement de 6 000 m³/s pendant 20 heures, ne provoquèrent de modification ou affouillement de ces sillons.

Pour vérifier l'influence des hélices des bateaux sur le revêtement, le laboratoire exécuta en outre des essais avec un modèle réduit du remorqueur « Uri » (quatre hélices de 900 ch), l'un des plus puissants en service sur le Rhin. Ces essais montrèrent que, lorsque le débit du Rhin est faible, les courants produits par les hélices provoquent une sollicitation du fond beaucoup plus forte que celle des crues extrêmes de 5 700 m³/s. Si les sillons créés dans la couche de protection par le remorqueur en marche sont d'importance limitée, le remorqueur immobile faisant tourner ses hélices à pleine puissance crée un affouillement d'environ 10 m de large et 15 m de long, d'une profondeur variant avec le débit du fleuve (pour 540 m³/s, qui correspond à une profondeur d'eau sur le revêtement de 2,40 m à 2,55 m, environ 1,80 m; pour 1 000 m³/s, 1,60 m et pour 1 500 m³, 1 m); derrière l'affouillement se forme un exhaussement d'environ 0,3 m de hauteur. Ces affouillements sont aussi importants que dans le cas du lit non revêtu; et les essais ont montré qu'il n'est pas possible de les éviter en augmentant l'épaisseur de la couche ou la grosseur des pierres dans des limites acceptables. Il faudrait donc accepter le risque de ces destructions locales, qui ne seraient d'ailleurs pas aggravées par le passage des crues les plus importantes.

Une dernière série d'essais fut effectuée pour étudier le comportement des couches de protection dans les tronçons en courbe; elle montra que lors de très hautes eaux des affouillements se produisent sur le bord intérieur de la couche de protection, dus aux courants de fond transversaux.

Tous ces travaux ayant donné des éléments précis sur les dispositions à prévoir, la « Commission des Travaux » fit exécuter en 1949 la fixation du fond du lit du Rhin sur un tronçon d'essai de 1 150 m de longueur en aval du débouché du canal de fuite de Kembs. La bande revêtue débordait de 10 m les alignements des pieds des talus des épis. Les observations faites sur ce tronçon complétèrent les résultats obtenus sur modèle. On observa entre les épis, le

long des bords du revêtement, des affouillements qui étaient particulièrement profonds dans les zones où les épis provoquent des tourbillons; dans ce cas les bords du revêtement se détachent et tombent dans les mouilles. Ce qui confirmait, après les résultats obtenus sur modèle, notamment dans les courbes, la nécessité d'étendre la couche de protection entre les épis, soit d'augmenter considérablement sa surface. D'un autre côté, par suite de la formation rapide d'une mouille à l'aval de l'extrémité du revêtement, un phénomène analogue à celui observé avec les seuils de fond y apparaît : écoulement turbulent, augmentation de la résistance à l'avancement des bateaux. Avec le temps, la prolongation du revêtement vers l'aval serait devenue indispensable; elle a été évitée par la mise en service du bief d'Ottmarsheim.

On exécuta enfin dans ce secteur des essais en nature de la tenue du revêtement du lit sous l'effet des hélices, avec plusieurs remorqueurs dont le « *Basel* » (deux hélices, 540 ch). Ils confirmèrent les observations sur modèle.

Les recherches et essais du Laboratoire de Zürich, suivis d'une réalisation sur un court secteur, donnaient des résultats extrêmement complets et précieux, et une vue très claire du problème. Le seul type de revêtement à retenir pratiquement résistait bien à l'action des crues, à condition de le réaliser sur une grande largeur, jusqu'entre les épis. Mais un risque certain est apparu, du fait des affouillements créés par les ancres et surtout par les hélices des bateaux, bien que ceux-ci n'avaient pas tendance à s'aggraver sous l'effet des crues et ne risquaient pas de provoquer la destruction du revêtement : les matériaux arrachés et déposés sur la couche de protection à proximité de l'affouillement, très difficiles à repérer, auraient constitué rapidement un danger très sérieux pour la navigation, car la profondeur d'eau de l'ordre de 2,50 m à l'étiage obtenue grâce à la rugosité du revêtement ne ménageait pas une marge de sécurité suffisante. La difficulté du contrôle permanent des profondeurs, et surtout d'éliminer les moellons dangereux sans endommager la couche de protection, ôtait toute garantie de sécurité malgré des frais d'entretien très lourds.

On ne pouvait guère dans ces conditions songer à engager des dépenses extrêmement élevées pour cette fixation (dépassant très largement celles correspondant à l'aménagement des épis), d'autant que la poursuite des travaux du Canal d'Alsace (le bief d'Ottmarsheim était alors en cours d'aménagement) permettait d'espérer une autre solution. Effectivement, avec la mise en service prochaine du 4^e bief, celui de Vogelgrün, tout le secteur du Rhin du barrage de Kembs à Brisach sera contourné par la navigation et le

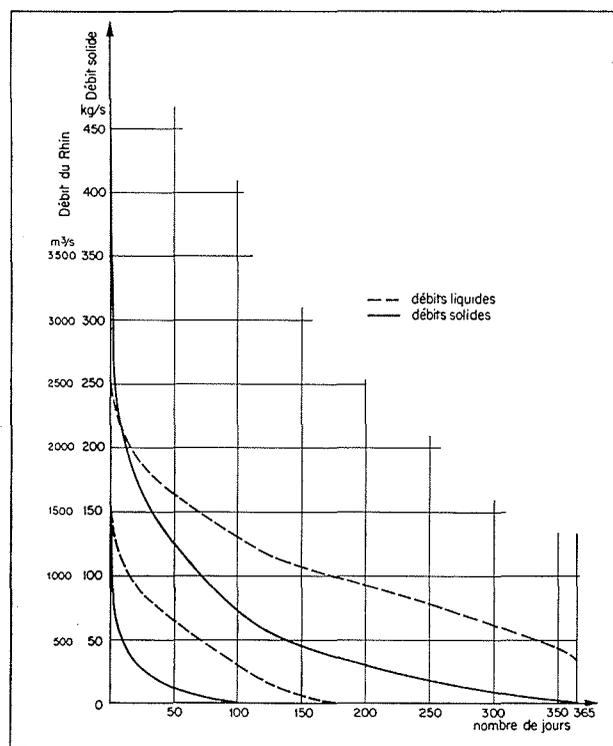


Fig. 20

Dérivaison de 1000 m³/s. Courbes des débits classés, liquides et solides, avec et sans dérivation. (Laboratoire de Zürich.)

sort des ouvrages de régularisation n'y aura plus guère d'importance. D'ailleurs l'érosion y sera extrêmement réduite du fait de la dérivation de la presque totalité du débit pendant une grande partie de l'année, et d'un débit de l'ordre de 1 200 m³/s en période de hautes eaux. Le Service Fédéral des Eaux et le Laboratoire de Zürich ont, à titre d'exemple, étudié l'influence de la dérivation d'un débit de 1 000 m³/s. Le Laboratoire a calculé, pour différentes pentes et différents diamètres déterminants des alluvions, les relations entre débits liquides et débits solides avec un profil déterminant correspondant au secteur du Rhin de Brisach. Connaissant ces relations et la courbe des débits classés à Brisach, il en déduisit les courbes des débits solides classés avec et sans dérivation. La figure 20 donne les courbes obtenues dans l'hypothèse d'une pente 1 ‰ et d'un diamètre déterminant des graviers de 0,025 m. Les surfaces comprises entre l'axe des abscisses et les courbes des débits classés représentent les débits annuels; le débit solide annuel apparaît réduit par la dérivation de 1 000 m³ dans une proportion qui est de l'ordre de 10 à 1. Ainsi la cadence de l'érosion dans le secteur du Rhin parallèle au Canal d'Alsace doit-elle être considérablement diminuée. Une réduc-

tion d'environ 1 000 m³/s du débit des crues ne modifie cependant pas beaucoup le profil d'équilibre final sans charriage d'alluvions.

La modification du projet du canal d'Alsace, décidée à la suite des accords franco-allemands d'octobre 1955, a conduit à prévoir à l'aval de Brisach une succession de retenues créées par des barrages contournés par des dériviations. La condition d'absence de charriage sera réalisée dans ces retenues pratiquement pour tous les débits; la première, celle de Marckolsheim, verra se déposer les faibles apports venant de la section Kembs-Brisach.

Les secteurs du Rhin contournés par les dériviations comporteront un ou deux seuils fixes

de 3 ou 4 m de hauteur destinés à y relever le plan d'eau; les faibles migrations de gravier seront localisées dans les courtes retenues créées par ces seuils. Le faible apport venant de la section située à l'aval du dernier seuil ira se déposer dans la retenue du barrage suivant. Moyennant quelques travaux d'entretien, le problème sera ainsi résolu dans le secteur de l'aménagement du Rhin par E.D.F. Cet aménagement terminé jusqu'à Strasbourg, la question se posera naturellement pour le secteur situé à l'aval, mais avec moins d'acuité puisque l'écart entre la pente réelle et la pente d'équilibre y est plus faible.

RÉSULTATS OBTENUS PAR LA RÉGULARISATION ET MISE AU POINT DU TYPE DE CONSTRUCTION DES ÉPIS

Quelles que soient les difficultés résultant de l'érosion du lit, la régularisation du Rhin entre Strasbourg et Bâle, comme celle du secteur aval, a eu le mérite d'aboutir dans un délai très court (nous avons vu 4 à 5 ans) à la création d'une voie navigable acceptable, qui a été ensuite progressivement améliorée pour être dès à présent, malgré le retard dû à la guerre, parfaitement au point. Après le développement du port de Strasbourg, dont le trafic dépasse maintenant 6 millions de tonnes, et du port de Kehl (environ 1 million de tonnes), le port de Bâle a connu, grâce à la régularisation et au contournement de la barre d'Istein, un développement remarquable; son trafic dépasse actuellement 5 millions de tonnes par an.

Les méthodes de construction des ouvrages ont d'ailleurs été constamment améliorées, et nous avons signalé qu'après la guerre les dégâts importants subis pendant celle-ci par les épis avaient conduit à de nouvelles recherches concernant leur mode de construction. Les défauts d'exécution et les passages d'automoteurs sur les épis pendant de courtes périodes de hautes eaux n'avaient qu'une portée limitée, de sorte que les facteurs essentiels de dégradation des épis paraissaient bien :

- Le déversement de l'eau sur ceux-ci, engendrant des mouvements tourbillonnaires à axe horizontal au pied aval des épis et à axe vertical entre deux épis.
- Les vagues de fortes amplitudes créées par les automoteurs et venant, en période de basses eaux, déferler sur les épis.
- Des phénomènes particuliers au pied même de l'épi, à l'endroit où son profil en long se

raccorde au plafond du chenal et où il se produit des affouillements.

L'application au cas des épis des résultats des études publiées par M. Blanchet en 1946 et 1947 dans cette même revue, concernant le déversement sur un massif d'enrochements, montrait que la stabilité des moellons d'enrochement une fois libérés de leur enveloppe en fascines ou en grillage métallique (le fil de fer même galvanisé ne résiste pas plus d'une dizaine d'années dans les eaux du Rhin) pouvait être menacée lors des très hautes eaux si l'épi ne s'était pas colmaté entre temps; en particulier une brèche créée dans un épi a tendance à s'accroître du fait qu'elle favorise l'augmentation du débit et des vitesses. L'étude de M. Blanchet a fait également apparaître l'importance de la densité des moellons : pour résister à un courant égal, un bloc de grès de poids spécifique 2,4 doit être 60 % plus lourd qu'un bloc de granit de poids spécifique 2,7. L'importance du fruit du parement aval de l'épi apparaissait faible, la tenue des moellons situés au bas de ce parement étant d'ailleurs améliorée par la présence de rouleaux à axe horizontal diminuant la vitesse locale du courant.

La nécessité de protéger les épis avait d'ailleurs été sentie dès l'élaboration du projet de régularisation, et nous avons vu que la solution adoptée avait été celle d'un revêtement offrant peu de prise au courant : pavage du couronnement, dont les éléments étaient en eux-mêmes insuffisants pour résister à l'action du courant, mais dont l'arrangement soigneusement exécuté pouvait conduire à un ensemble présentant dans des conditions normales une stabilité satisfai-

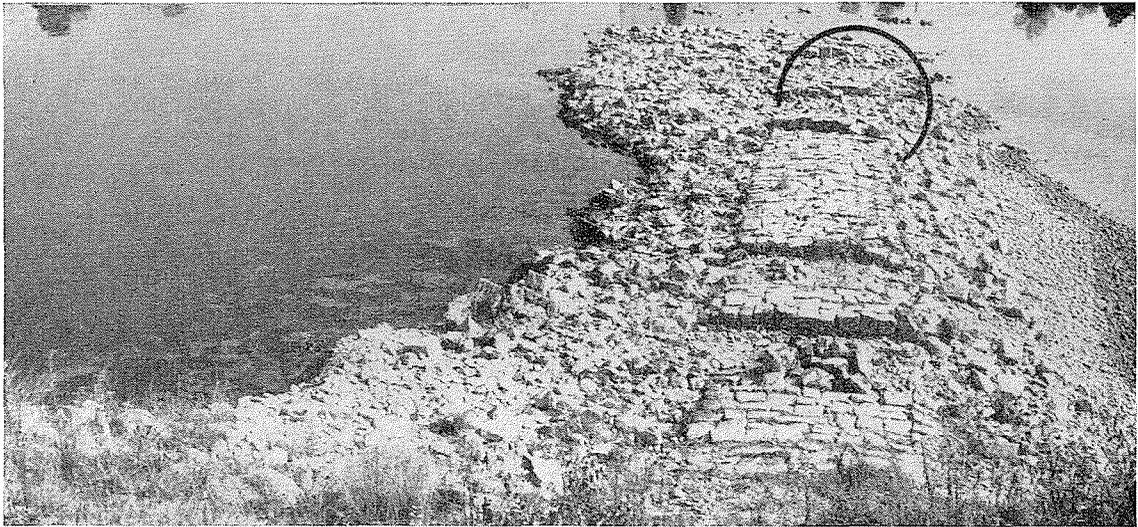


FIG. 21

(Photo W.S.D., Freiburg.)

Destruction du pavage d'un épi.

sante. L'expérience montra qu'il n'était pas possible de réaliser exactement un tel revêtement, qui ne peut être efficacement appuyé sur le talus aval de l'épi, et tend, dès que certains éléments viennent à disparaître, à se disloquer par tranches perpendiculaires à l'axe de l'épi (fig. 21).

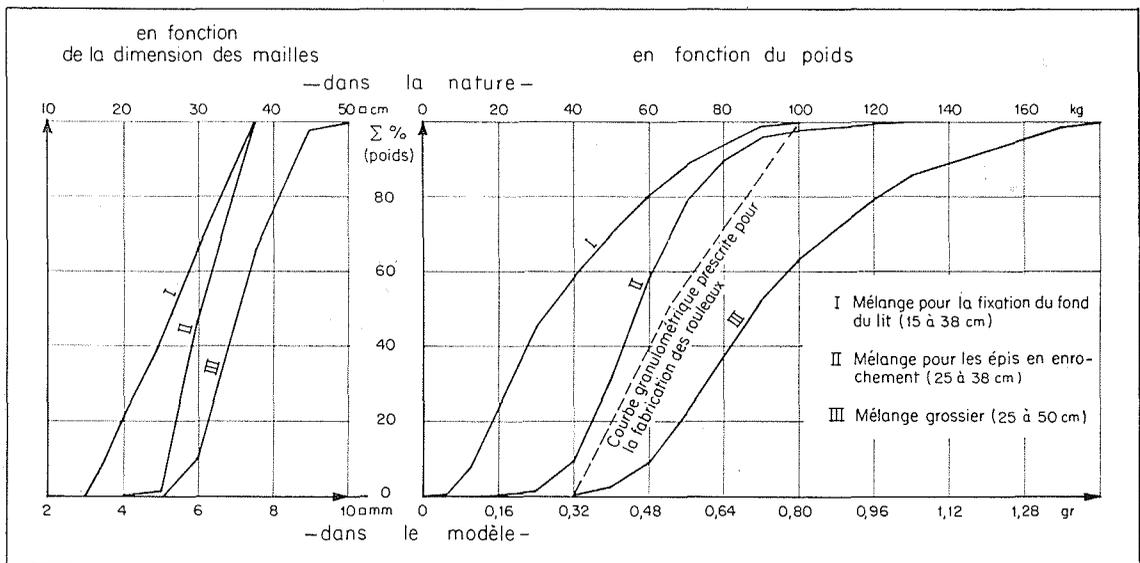
Dans le souci de préciser le type le plus rationnel d'aménagement des épis, la Commission des Travaux de la Régularisation confia au Laboratoire de Zürich l'étude de ce problème sur modèle réduit, le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique devant prêter à l'occasion son con-

cours. Les études longues et minutieuses du Laboratoire de Zürich portèrent particulièrement sur les questions suivantes :

- Stabilité des épis tels qu'ils avaient été construits en gabions, et influence de la destruction des gabions métalliques.
- Recherche d'un type d'épi stable constitué de moellons jetés en vrac, et comportant le cas échéant un noyau en gravier.
- Protection du pied de l'épi contre l'érosion, et enfin recherche d'un procédé assurant une protection efficace contre les survitesses dues

FIG. 22

Construction économique des épis. Essais sur modèle à Zürich.
Courbes granulométriques des trois mélanges examinés.



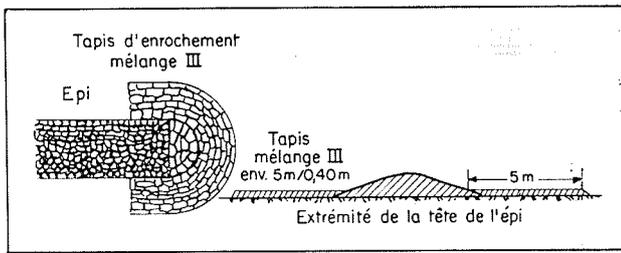


FIG. 23

Essais sur modèle à Zürich.
Protection de la tête d'un épi.

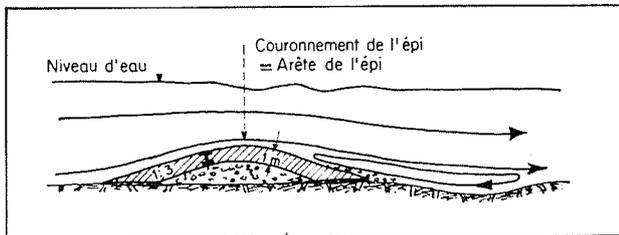


FIG. 24

Essais sur modèle à Zürich.
Epi avec noyau en gravier.

au passage des hélices des bateaux au-dessus des épis.

Les résultats obtenus peuvent être résumé comme suit :

1. Contrairement à ce que l'on avait admis jusqu'alors, la zone située immédiatement en aval de l'épi apparut comme une zone de dépôt du fait de la présence d'un rouleau à axe horizontal; le talus amont étant par contre le plus exposé. Il aurait donc fallu envisager de construire les épis en décalant les gabions vers l'aval et non vers l'amont.
2. Des épis constitués entièrement d'enrochements jetés en vrac sont stables sous les plus grandes crues, à condition de leur donner un profil en travers judicieux dépendant des dimensions des moellons utilisés. La figure 22 donne les courbes granulométriques des mélanges soumis aux essais, ainsi que celle du mélange qui avait été utilisé pour la fabrication des rouleaux. L'inclinaison du talus côté amont ne doit pas être supérieure à $1/3$ pour des blocs du mélange I ou II, et le raccordement de ce talus amont avec le couronnement doit être très arrondi. Le couronnement lui-même doit être aussi large que possible. Avec des moellons du mélange III, la pente du talus amont peut être ramenée à $1/2$. Le talus aval aura tendance à se former naturellement par les dépôts déjà signalés.
3. La partie la plus vulnérable de l'épi est le talus situé entre la tête et le pied de l'épi

côté chenal. Pour éviter sa détérioration, il faut fonder cette partie en dessous du niveau du fond du lit. A défaut, il est nécessaire de la recouvrir de moellons grossiers du mélange III, et de la protéger des affouillements en consolidant le fond du lit sur son pourtour avec un tapis de moellons du même mélange (fig. 23).

4. Le corps même de l'épi peut être construit en gravier, l'épaisseur du revêtement en enrochements doit être de l'ordre d'un mètre avec des moellons du mélange I (fig. 24); par ailleurs, les mêmes précautions que ci-dessus doivent être prises pour la tête de l'épi. Sous réserve de possibilité pratique d'exécution, cette solution conduit à une économie sensible de matériaux, surtout si l'on note que la construction d'un épi en enrochements consomme 50 % de moellons de plus que pour un épi en gabions (ce qui montre l'importance des vides dans ceux-ci).
5. Les épis en gabions essayés sur modèle se sont en général bien comportés, des crues de longue durée ont cependant quelque peu déplacé les gabions, surtout entre la tête et le pied de l'épi (fig. 25). Cela est probablement dû à ce que, les épis étant mal colmatés, les rouleaux sont sur le modèle affouillés sur leur côté amont; ils sont en effet plus rigides que ceux employés en réalité et ne peuvent épouser correctement la configuration du fond du lit. L'extrapolation des résultats obtenus dans ce domaine reste toutefois moins certaine.
6. Les épis en enrochements ne peuvent résister efficacement à l'action des hélices des bateaux; faute d'une protection particulière qui serait nécessaire pour ceux d'entre eux qui sont spécialement exposés, un revêtement du couronnement au moyen de gabions métalliques remplis de moellons reste encore dans ces conditions la moins mauvaise solution.

Ces résultats sont extrêmement intéressants. Ils font apparaître que les solutions préconisées ne comportent pas de marge de sécurité pour un secteur de pente 1% tel que celui sur lequel elles ont été essayées, mais donnent toute garantie sur la plus grande partie du secteur de régularisation. Des essais de construction et réparation d'épis par enrochements jetés en vrac, furent exécutés sur le Rhin; plus simple d'exécution et supprimant les gabions métalliques, ce procédé se révéla d'un prix voisin de celui des épis en gabions, et même inférieur pour les réparations. Il avait le grand avantage de faciliter une mise en œuvre mécanisée, de donner à l'épi une surface beaucoup plus régulière, et en outre de permettre une réparation commode des épis au fur et à mesure que des dégâts étaient si-

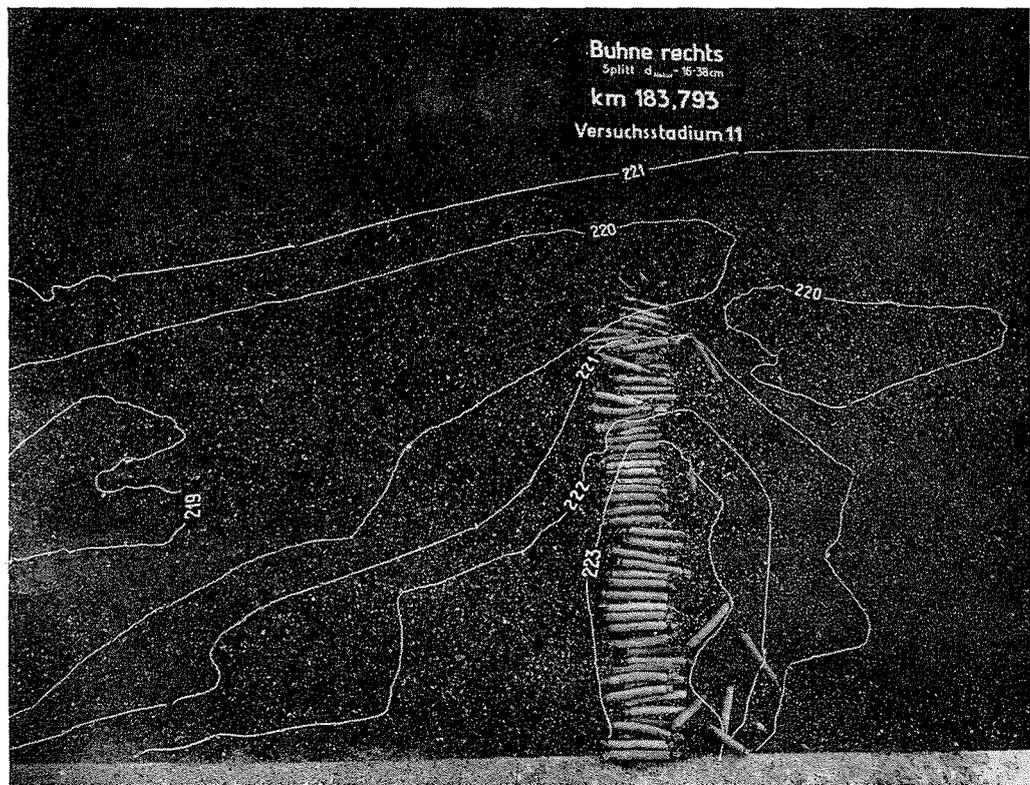


FIG. 25

Essais sur modèle
à Zürich
d'un épi construit
au moyen de gabions.
Trop rigides,
certains
ont été déplacés
lors des crues.

(Doc. Laboratoire
de Zürich).

gnalés, alors que l'utilisation de gabions d'un diamètre de 0,80 m conduisait à attendre que la dégradation ait atteint une certaine ampleur avant d'effectuer les réparations, ou à consommer inutilement des matériaux. Le type de construction par enrochements en vrac fut donc rapidement généralisé (fig. 26). La constitution

d'un noyau en gravier recouvert d'enrochements ne pouvait conduire à des économies que pour des réparations portant sur des hauteurs très fortes ou pour de nouvelles constructions; la possibilité en reste d'ailleurs assez théorique, car le noyau en gravier disposé transversalement est aussitôt dérasé par le courant; sur le

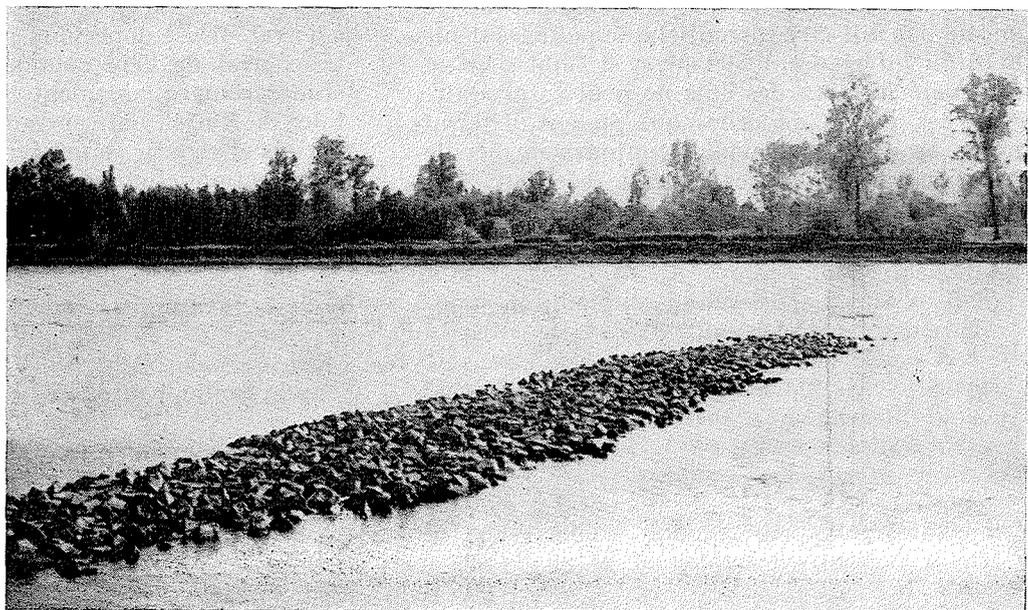


FIG. 26

Epi construit
en enrochements.

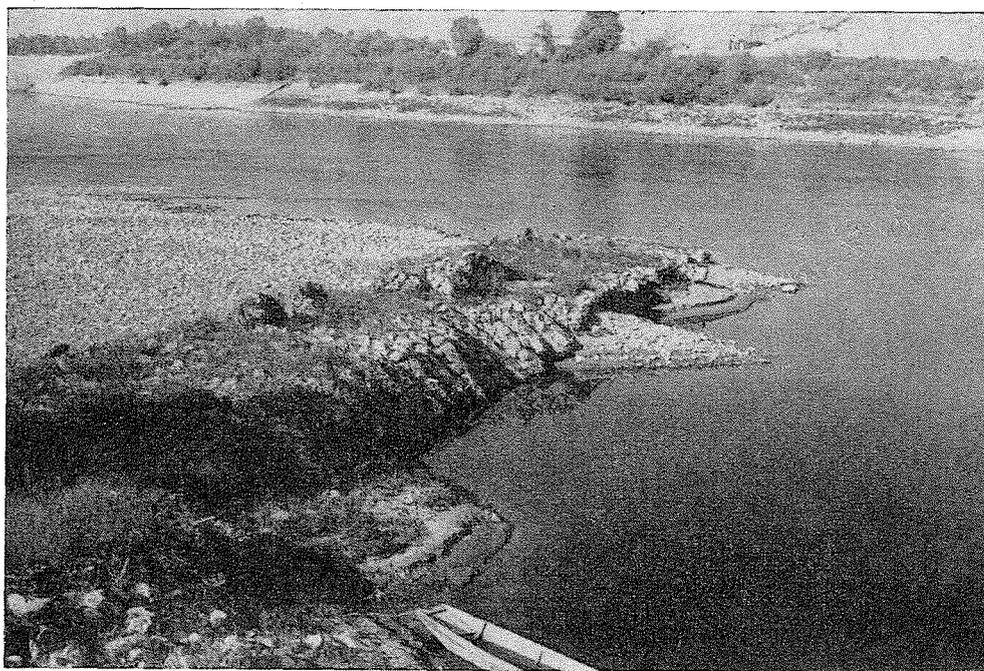


FIG. 27

Affouillement
en aval d'un épi.
(Doc. Reimann, Bâle.)

Rhin supérieur, il faudrait pratiquement constituer ce noyau de nasses en grillage remplies de gravier, ce qui compliquerait singulièrement l'exécution des épis.

Les ouvrages construits ou réparés selon les nouvelles méthodes se sont jusqu'ici fort bien comportés. Cependant, on a observé que des atterrissements se produisaient souvent à l'amont des épis et non pas à l'aval, et qu'à cet endroit au contraire avait lieu un affouillement immédiatement au pied de l'épi et au voisinage de sa racine (fig. 27). Rappelons que les essais sur modèle avaient montré que l'écoulement sur les épis ne pouvait être torrentiel que pour les débits du Rhin inférieurs à $800 \text{ m}^3/\text{s}$, si faibles qu'aucune détérioration des épis ne peut se produire. Pour les débits de crue, qui étaient déterminants, on avait sur modèle toujours un écoulement en surface avec rouleau inférieur remblayant à l'aval de l'épi. En examinant au

contraire le cas extrême de l'écoulement torrentiel de d'eau par-dessus un épi isolé avec une vitesse de l'ordre de 5 m/s , la différence de hauteur entre les niveaux amont et aval étant très forte, le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique avait observé une attaque très énergique du talus aval. Bien que ce type d'écoulement semble exclu dans le cas d'un système continu d'épis en bon état, ainsi que le montrent les observations sur modèle de Zürich, on peut se demander si sur le fleuve il n'apparaît pas des cas particuliers, ce qui permettrait d'expliquer certaines détériorations d'épis avec formation de mouilles à l'aval. Il est donc plus prudent de protéger le talus aval de l'épi comme le talus amont. Les études remarquablement menées par le Laboratoire de Zürich ont, moyennant cette précaution, permis d'aboutir à un type d'ouvrage parfaitement rationnel et économique.