PROBLÈMES D'ACCUMULATION DANS LE LIT DU DANUBE ENTRE DEVIN ET SZOB

PAR
J. FURDICK *
ET
K. STELCZER **

1/ Vue de la ville de Bratislava.

Blick auf die Stadt Bratislava.

Un panorama extraordinaire et inattendu s'offre aux yeux du navigateur sur le Danube lorsqu'il entre, par la « Porte de Devin », dans le bassin des Karpates. Il voit encore les collines de Bratislava avec les ruines pittoresques du château (fig. 1), mais le Danube se divise déjà en de nombreuses branches et s'étale d'une manière bien caractéristique du cours inférieur des fleuves, créant une multitude d'îles et îlots sur le grand cône de déjection entre Bratislava (km 1870) et Gönyü (km 1791). A la fin du tertiaire, il y avait ici un lac intérieur, qui fut remblayé en premier lieu par le débit solide du

Danube. Par suite du dépôt continu du débit solide, la partie du cône de déjection située entre les levées de protection ne cesse de s'exhausser, même aujourd'hui. L'importance du remblayage est illustrée par le fait que l'épaisseur de la couche de gravier alluvionnaire dépasse 400 m, voire même 2 500 m en certains endroits. Et pour que le contraste soit plus marqué, ce secteur du Danube étalé sur la plaine alluviale (fig. 2) a été nommé le « Haut-Danube ». En effet, c'est la partie supérieure du secteur central, au point de vue géographique, du Danube (Devin-Portes de Fer). C'est un secteur de transition entre le cours supérieur et le secteur à caractère de plaine, séparés l'un de l'autre par une rupture de pente géologique. Alors que sur le secteur Bratislava-Palkovičovo (km 1810) la pente moyenne est de 35-40 cm par km, après

* Ingénieur, Directeur de l'Institut de Recherches de l'Economie Hydraulique à Bratislava (Tchécoslovaquie).

** Ingénieur, Directeur de l'Institut de Recherches des Ressources Hydrauliques à Budapest (Hongrie).

le court secteur de transition Palkovičovo-Gönyü (km 1791), avec une pente de 12 à 15 cm par km, cette valeur tombe, en aval de Gönyü, à 6-10 cm/km (fig. 3).

1. Conditions hydrologiques.

RÉGIME DES EAUX; LES DÉBITS :

Le caractère du régime d'eau et les conditions d'écoulement du secteur considéré du Danube sont grandement influencés par le réseau de bras secondaires, le sous-sol alluvial fort perméable et la rupture de pente au km 1810.

Pendant les ondes de crue, dans la période de montée, les eaux remplissent les bras secondaires, le lit majeur et le sous-sol; une partie de l'eau arrivant à ce secteur s'emmagasine. Pendant la période de décrue, l'eau emmagasinée s'écoule en partie. Sous l'action de ces phénomènes, le régime du secteur aval est plus équilibré que celui du secteur d'amont.

Le passage des ondes de crue est encore influencé par la rupture de la pente à Palkovičovo. A l'aval de ce point, leur vitesse de propagation diminue et l'eau s'étale. Une nouvelle onde de crue peut rattraper la précédente, qui a déjà rempli le lit,

4/ Photographie aérienne d'un secteur du « Haut-Danube ».
Luftaufnahme eines Abschnitts der « Oberen Donau ».

et une situation dangereuse peut se produire au point de vue de la défense contre les crues.

A l'aval de Bratislava, le transport d'eau du lit principal diminue sous l'effet de drainage et d'emmagasinement des nombreux bras secondaires, puis à l'aval de la rentrée de ces bras, à Medvedov (km 1806), leur débit rejoint dans sa presque totalité le lit principal (fig. 3).

Du point de vue du débit du lit principal, on peut distinguer quatre étapes caractéristiques, à savoir :

a) Le débit total s'écoule dans le lit principal (jusqu'au débit de 1 800 m³/s à Bratislava);

b) L'eau se déverse par-dessus les ouvrages de fermeture des bras secondaires et remplit progressivement leurs lits (débit de 1 800-2 300 m³/s à Bratislava);

c) L'eau atteint les crêtes des rives, réunit le lit principal et les bras secondaires en un système actif de transport d'eau (débit voisin de 4 000 m³/s à Bratislava);

d) L'eau remplit le lit majeur tout entier (débit de 4 000-6 000 m³/s à Bratislava).

A l'époque de crue, les quatre étapes se recouvrent les unes les autres.

Le tableau I montre les débits du lit principal dans les différents profils du secteur considéré, en pourcentage du débit de Bratislava.

Des données du tableau, on peut voir que, pour des apports supérieurs à 2 000 m³/s, le débit du lit principal varie beaucoup de secteur en secteur. Par conséquent, chaque secteur a ses conditions d'écoulement caractéristiques différentes suivant l'importance et la capacité des systèmes de bras secondaires.

Nous donnons dans le tableau II les débits caractéristiques du secteur examiné.

Les données du tableau confirment le bien-fondé des constatations que nous avons faites par rapport au régime d'eau du secteur examiné du Danube, à savoir que, jusqu'à Gönyü, les débits de crue diminuent sous l'effet des bras secondaires, de la largeur du champ d'inondation et du sous-sol perméable, tandis que les débits moyens et minimaux augmentent.

CONDITIONS DE PENTES (fig. 2) :

Entre les km 1870 et km 1840 la pente est presque constante : 0,35-0,37 ‰.

En aval du km 1840 jusqu'au km 1821, la pente moyenne diminue lentement (0,28-0,30 ‰), puis du km 1821 au km 1805, plus rapidement (0,18-0,20 ‰).

Sur le secteur allant du km 1805 au km 1770, la diminution est de nouveau ralentie : la pente tombe de 0,18-0,10 successivement jusqu'à 0,10-0,06 ‰. Les pentes générales sont toutefois fortement influencées par les conditions locales.

Les valeurs limites locales atteignent respecti-

vement 0,43 ‰ et 0,05 ‰. Par suite de l'influence des bras secondaires, il ne se rencontre presque aucun secteur dans lequel la pente soit à peu près constante. Les variations minimales se présentent sur les secteurs allant du km 1830 au km 1814, du km 1805 au km 1795, et du km 1785 au km 1770, donc sur 41 km seulement du secteur, long de 100 km. Les secteurs où la pente diminue si le débit augmente méritent de retenir une attention spéciale, tels sont les secteurs du km 1859-1860, des kilomètres 1854-1855, 1842-1843, 1832-1834, 1828-1830, 1821-1822, 1817-1819, 1810-1814 et 1807-1808.

RÉGIME DES GLACES :

L'apparition de la glace sur le Danube est un phénomène se répétant chaque année (fig. 5).

Les conditions des glaces du secteur examiné sont caractérisées par le fait que les embâcles provoquant des dangers se présentent dans les années où la prise du fleuve se produit en période d'étiage. Les observations de longue durée révèlent les endroits caractéristiques des embâcles. Ceux-ci se situent sur les hauts-fonds se formant à l'aval des grandes courbes, les plus caractéristiques d'entre eux se produisant dans le secteur à l'aval de Bratislava et au voisinage des kilomètres 1836 à 1838.

Au cas où la prise a lieu en période d'étiage, un phénomène intéressant se poursuit sur le secteur du km 1850 au km 1816. Le niveau d'eau du fleuve est plus bas que le niveau de la nappe phréatique; de ce fait, les eaux souterraines, de température relativement élevée, font diminuer dans les bras secondaires l'épaisseur de la glace, et même la font fondre dans certains cas.

LE LIT DU FLEUVE :

Les dimensions géométriques du lit sont déterminées par la pente du fleuve, les matériaux constituant le lit et les débits liquide et solide à transporter. Si les dimensions du lit varient considérablement dans l'état naturel, c'est par la régularisation qu'il faut assurer leur variation graduelle et uniforme. En ce qui concerne le secteur du Danube considéré, c'est la variation excessive des dimensions du lit qui l'ont caractérisé avant la régularisation. Le fleuve divaguant sur son cône de déjection en matériaux meubles a changé son lit après chaque crue (fig. 6).

Au cours de la régularisation, un lit principal a été créé; cependant, le fond du lit n'a pas cessé d'avoir une tendance à s'exhausser. La figure 7 montre, pour chaque échelle limnimétrique du secteur, les hauteurs d'eau correspondant, dans les années 1920 à 1960, à la hauteur d'eau de + 300 cm à Bratislava par rapport au niveau de l'étiage navigable fixé en 1932.

La figure indique nettement le caractère d'exhaussement de ce secteur.

En examinant la figure 8, on peut constater que le plus grand exhaussement du niveau d'étiage, par rapport au niveau d'étiage navigable fixé en 1934 (niveau correspondant au débit de 1 000 m³/s), s'est produit entre les kilomètres 1820 (Gabčíkovo) et 1813.

Dans le secteur allant du km 1826,63 au km 1823,78, l'exhaussement annuel est de 2,72 cm, au km 1820, de 2,52 cm, et au km 1810, elle est de 2,40 cm. Pendant les années 1951-1959, une certaine stabilisation a eu lieu aux environs des échelles de Dobrohošť (km 1840), Gabčíkovo (km 1820) et Gönyü (km 1791), et même un creusement partiel

5/ Photo d'un secteur du Danube. Les premiers glaçons.
Aufnahme eines Donauabschnitts. Die ersten Eisschollen.

7/ Variation, au cours des années 1920-1960, des niveaux d'eau correspondant aux échelles du secteur Bratislava-Komárno du Danube à la hauteur d'eau de + 300 cm à Bratislava.

Schwankungen der Wasserstände, die sich auf die Pegel im Donauabschnitt Bratislava-Komarno bei einer Spiegelhöhe von + 300 cm bei Bratislava beziehen (1920-1960).

8/ Exhaussement des niveaux d'étiage de 1947 à 1959.

Erhöhung der Niederwasser-Spiegelhöhen von 1947 bis 1959.

6/ Un secteur du Danube entre Bratislava et Gönyü avant la régularisation.
Détail de la carte topographique de l'époque.

*Ein Donauabschnitt zwischen Bratislava und Gönyü vor der Regulierung.
Auszug aus der topographischen Karte dieser Zeit.*

aux environs des échelles de Palkovičovo (km 1810), de Medvedov (km 1806) et de Zlatna na O. (km 1778). Ces phénomènes peuvent être expliqués par le dragage intensif effectué pendant la période examinée.

La hauteur du terrain du champ d'inondation diminue à partir des rives du lit principal vers les bords du cône de déjection. En effet, les eaux débordantes perdent, par suite de l'étalement, la majeure partie de leur force tractrice, ce qui a pour conséquence une sédimentation au voisinage des rives. Aujourd'hui même, cette chaîne de dépôts sur les rives est une des caractéristiques du profil transversal du lit majeur.

La largeur du plan d'eau varie entre des limites très larges, même pour des hauteurs d'eau identiques. Aux plus hautes eaux, la largeur du plan d'eau dépasse par endroits 5 km, entre les berges naturelles, comme entre les levées de protection contre les crues, alors qu'elle n'atteint pas 1 km ailleurs.

LA VITESSE DU COURANT :

Un des éléments hydrauliques les plus variables du secteur est la vitesse de l'eau. Elle est influencée d'une manière décisive, en dehors de la pente et de la hauteur d'eau, par les dimensions du profil transversal. A des conditions moyennes, la vitesse moyenne est de 2,2 m/s à l'extrémité amont du secteur, alors qu'à la limite aval c'est la vitesse de 0,9 m/s qui est caractéristique.

Sur la partie la plus critique du secteur, entre Rajka et Medvedov (km 1848-1806), les vitesses moyennes se présentant dans le lit principal sont indiquées dans le tableau III, en fonction du débit à Bratislava.

TRANSPORT DE DÉBIT SOLIDE :

Un charriage extraordinairement intensif est caractéristique du secteur du Danube entre Rajka et Gönyü. La plus grande partie du débit solide venant du secteur autrichien, soit environ 2,2 millions de mètres cubes par an, est constituée par des matériaux en suspension, alors que le débit charrié se monte à environ 600 000 m³ à Rajka. Néanmoins, c'est ce dernier qui joue le rôle décisif, puisque sa plus grande partie se dépose entre les kilomètres 1820 et 1806 par suite de la diminution de la force tractrice, pendant que le débit solide en suspension continue son chemin dans sa totalité, sans entraves. Le mouvement du débit charrié s'effectue selon les lois régies par les conditions hydrauliques et hydrologiques locales, fort variables et s'enlaçant mutuellement les unes aux autres sous l'effet de la ségrégation simultanée et de l'usure des grains des matériaux transportés.

La figure 9 montre le mouvement du débit charrié au fond du lit. On y peut distinguer une partie du fond (A) où les grains ne bougent pas, généralement sur la partie voisine de la berge, du côté convexe du profil transversal, où la force tractrice n'atteint que rarement, pendant la période des hautes eaux, sa valeur critique. Les grains peuvent être envasés par des matières fines, ce qui, toutefois, n'arrive généralement guère sur le secteur examiné du Danube. En ce qui concerne la formation du lit, les exhaussements du fond, de caractère local, prédominent à ces endroits.

Une autre partie caractéristique du périmètre est la bande de transition, caractérisée par le mouve-

ment de grains individuels. Le mouvement peut s'étendre, en certains cas, sur toute la largeur de la bande du charriage. (Les seuils sont caractérisés en général par un mouvement sur toute la largeur du fond.)

Dans la bande adjacente, le mouvement du débit charrié est intense; des bancs d'alluvions, des dunes se produisent. Dans le cas de rivières aux rives concaves bien formées et de tracé adéquat, la zone

9/ Zones de mouvement du matériau charrié dans un profil transversal.

Bewegungszonen der Geschiebefracht in einem Querprofil.

de charriage du débit solide correspond à la partie du fond indiquée par B sur la figure 8.

Dans la zone C du profil examiné, il n'y a pas charriage dans la direction du thalweg, car c'est la partie du profil transversal où le courant transversal est le plus fort. Par suite de l'entraînement des particules fines, une couche de protection efficace, un « pavage naturel » du fond, se forme ici, ce qui empêche une érosion ultérieure. Les cailloux se déplacent rarement dans cette zone, car le courant transversal rend le passage des grains impossible.

La figure 10 montre la variation du diamètre effectif (à 65 %) du matériau de fond dans le secteur examiné, sur la base de l'analyse des sept échantillons pris dans chaque profil. Jusqu'au km 1822, une diminution de 0,04 mm/km peut être observée, avec des écarts locaux considérables. Du km 1822 au km 1810 le diamètre effectif des grains diminue de 1 mm/km; en aval du km 1810 jusqu'à Zlatna na O. (km 1778), l'usure atteint 0,08 mm/km avec des variations minimales. L'écart entre les minimums et les maximums des diamètres effectifs déterminés pour une série de profils transversaux est de 10 mm dans le premier secteur, de 2 mm dans le deuxième et de 5 mm dans le troisième.

A la suite des travaux de régularisation à basses eaux effectués entre les kilomètres 1863 et 1822 (secteur I sur la figure 11), la rugosité du lit est considérablement accrue entre les kilomètres 1822 et 1810 (secteur II); un classement fort accentué du débit charrié a lieu sous l'influence des embranchements (variations subites du débit et de la pente locale). Plus en aval, sur le troisième secteur, les matériaux du fond deviennent plus gros, probablement par suite des travaux de dragage considé-

10/ Variations des valeurs moyennes et extrêmes du diamètre effectif ($d_{65\%}$) des matériaux de fond.
Schwankungen der mittleren und Höchstwerte des wirksamen Durchmessers ($d_{65\%}$) des Sohlenmaterials.

11/ Limites de variation du diamètre effectif ($d_{65\%}$) du matériau de fond.
Schwankungsgrenzen des wirksamen Durchmessers ($d_{65\%}$) des Sohlenmaterials.

12/ Courbes granulométriques du matériau de fond pour quelques profils choisis.
Siebkurven des Sohlenmaterials für einige ausgesuchte Profile.

rables effectués entre les kilomètres 1780 et plus en aval.

Sur la figure 12, nous avons représenté les courbes granulométriques du matériau du fond pour trois profils caractéristiques. On voit nettement que la granulométrie du débit charrié devient toujours plus fine.

Quant aux *matériaux en suspension* du secteur considéré, on peut distinguer deux groupes d'origine différente. Au premier groupe appartiennent les grains fins provenant du bassin versant. Leur concentration ne cesse de varier, même à des époques ayant des conditions d'écoulement identiques, et n'est en aucun rapport avec des caractéristiques hydrauliques.

Le deuxième groupe comprend les grains plus gros, dont la concentration suit les variations du débit liquide. Cette partie du débit solide en suspension prend part à un processus incessant

d'échanges, passant du fond à l'état de suspension et inversement.

Le tableau IV indique les transports moyens annuels du secteur examiné en fonction du débit d'eau moyen annuel.

LES EAUX PHRÉATIQUES :

Le Danube, en tant que lit principal de sa vallée, influence, dans une grande mesure, le régime des eaux phréatiques des terrains environnants. Grâce à la perméabilité importante des graviers du cône de déjection (coefficient de perméabilité $k = 0,5-1 \text{ cm/s}$) et à l'épaisseur considérable des couches

13/ Coupe transversale du cône de déjection du Danube au km 1840.
Querschnitt des Schuttkegels der Donau bei km 1840.

perméables sous les levées (10 à 200 m), les eaux phréatiques des terrains protégés sont en liaison étroite avec les eaux du Danube. Le relèvement de la nappe phréatique suit cependant beaucoup plus rapidement les crues du Danube qu'on ne pourrait le croire en faisant un calcul avec le coefficient « k ». La cause en est la poussée hydrostatique, le plan d'eau étant plus haut dans le lit du Danube que le fond de la vallée (fig. 13). La vitesse de propagation de cette pression change, d'après sa grandeur et d'après la perméabilité des couches inférieures, entre 0,3 et 3 m/s. Dans les cas exceptionnels, elle atteint 5,5 m/s.

Les variations les plus importantes du niveau de la nappe phréatique se produisent en aval de Bratislava, dans les parties supérieures des deux grandes îles formées du côté gauche par le bras dit Petit Danube et du côté droit par le bras de Moson (Žitný ostrov et Szigetköz) (voir fig. 2), dans un tronçon long de 40 km et jusqu'à une distance de 8-10 km du lit principal. Cette bande active devient progressivement de plus en plus étroite dans la direction du courant.

Le Danube atteint son plus haut niveau au cours des mois de printemps et d'été, c'est-à-dire dans la saison de végétation. C'est en ce temps-là qu'on peut constater de grandes intumescences des eaux phréatiques. Les travaux de recherches ont confirmé que pendant la crue de 1954, par exemple, le territoire de Žitný ostrov a reçu 201 m³/s d'eau au maximum, dont 63 m³/s sont apparus sur la surface. Cela signifie que les eaux d'infiltration passant par le sous-sol des levées atteignent sur certains secteurs 300 à 1400 l/s.km, dont 0 à 980 l/s.km peuvent surgir sur des surfaces protégées. L'affluence souterraine est la plus grande dans la région la plus élevée du cône de déjection (entre les kilomètres 1852 et 1810). La quantité maximale des eaux d'infiltration jaillit aux environs des kilomètres 1780 à 1770.

La surface globale inondée par les eaux sauvages (dites intérieures) comportait en 1954 quelque 10 000 ha. Le drainage des terrains environnants est par conséquent un problème sérieux, du point de vue hydraulique en même temps qu'agricole.

En aval de Komárno, l'influence du Danube sur les eaux phréatiques est sensiblement plus faible.

2. Interventions du génie civil, à caractère historique.

Les trouvailles de vestiges des âges de la pierre et du bronze faites aux alentours du secteur en question prouvent la présence dans ce territoire de colonies datant de l'âge préhistorique. Il est évident que la défense contre l'eau — cette force élémentaire de la nature — commença dès cette époque. Les premiers vestiges subsistant encore de la lutte de l'homme contre les inondations — ceintures de protection installées autour d'une colonie — proviennent déjà des temps historiques. Le premier document écrit enregistre la crue du Danube en l'année 1012, au cours de laquelle « bien des personnes et d'animaux ainsi que d'édifices ont été détruits ». L'ordonnance du roi Sigismond adressée en 1426 à la ville de Somorja est considérée comme le début de la *lutte organisée contre les inondations*; cette ordonnance décrétait la construction et la remise en état des levées de protection et des ceintures, devant être réalisées selon les instructions.

La construction systématique de levées de protection a commencé en 1850 sur la rive gauche et après 1890 sur la rive droite (fig. 14).

14/ Evolution du profil transversal des levées du Danube.
Fortschreitende Entwicklung des Deichquerschnitts.

Certes, les levées ont assuré une défense contre les inondations directes; l'eau a réapparu cependant derrière les levées, du fait des précipitations, mais surtout comme eau jaillissante. La lutte contre les eaux stagnantes a commencé en vue de la protection de l'agriculture. La première association de drainage s'est formée sur la rive gauche en 1854, donc à peine quelques années après la construction systématique des levées régulières de

protection. L'évolution, dictée manifestement par l'intérêt direct de l'agriculture, est caractérisée par le fait que, dès 1876, trois associations de ce genre fonctionnaient sur la rive gauche du Danube.

Outre la défense contre les inondations et le drainage des eaux nuisibles, les besoins de la navigation ne tardèrent pas à se présenter. Le fleuve, divisé en mille branches changeant bien souvent non seulement leur section, leur profondeur, mais aussi dans bien des cas leur lit, les bateaux ne pouvaient circuler qu'avec les plus grandes précautions. Les difficultés de la navigation peuvent être illustrées le mieux par deux données, selon lesquelles, d'une part les chômages forcés dans la navigation se sont étendus en 1870 sur cent soixante-quatre jours et en 1875 sur cent seize jours, d'autre part qu'en 1877 quatre cent quarante péniches de plus étaient nécessaires pour alléger les sept cent quatre-vingts péniches demeurées en route. Sur les bancs de gravier et dans les divagations des lits, les glaçons flottants se sont souvent arrêtés, des embâcles se formaient et les crues de débâcle débordaient souvent par-dessus les levées de protection relativement basses.

Par suite de cette grave situation, le désir de commencer les travaux de régularisation du fleuve se manifesta de plus en plus de divers côtés.

La protection des agglomérations humaines et des territoires agricoles contre les inondations et les eaux intérieures nuisibles, ainsi que le développement des transports par eau, ont imposé de façon impérieuse, avec rythme et ordre d'importance divers, l'exécution et le développement de différents travaux.

Les ouvrages de défense contre les crues et de drainage, ainsi que de régularisation du lit, furent réalisés aux époques et avec l'importance résultant des besoins.

TRAVAUX DE DÉFENSE CONTRE LES CRUES :

Parmi les travaux de régularisation, c'est la construction des levées de défense contre les crues qui était très fortement influencée, peut-être même le plus, par les intérêts étroits locaux. D'une part, les innombrables bras du fleuve changeant continuellement leurs lits; d'autre part, les limites des domaines individuels déterminaient le tracé des levées de protection et, ni la nature du sous-sol, ni les principes de la régularisation des rivières n'étaient pris en considération. La largeur du champ d'inondation change capricieusement entre les valeurs extrêmes de 1,1 et 5,7 km, et les levées traversent par-ci par-là de vieux bras remblayés par de la vase, endroits absolument mauvais au point de vue du sous-sol. Par conséquent, les levées ne remplissent pas, d'une part, leur rôle de régularisation du lit (ce qui ressort clairement de la fig. 2) et, d'autre part, elles ont d'innombrables points faibles, ce qui est prouvé par la plupart des crues qui ont eu lieu jusqu'à maintenant, ainsi que par les investigations géohydrologiques.

Après la construction des levées de protection, un nouveau problème s'est posé, à savoir que les crues, ne pouvant plus s'étaler sur de vastes territoires, déposent une partie de leur débit solide dans le champ d'inondation relativement étroit, par suite de quoi leur exhaussement a commencé. Suivant les mesures jusqu'ici effectuées, le rythme de l'exhaussement est de 1 cm/an sur le secteur du fleuve, du km 1850 au km 1806. La cote des terrains pro-

15/ Vue d'une digue parallèle.

Ansicht eines Längswerks.

16/ Vue d'une digue de fermeture d'un bras secondaire.

Ansicht des Verschlussdeichs eines Nebenarms.

tégés restant invariable, l'exhaussement continu du lit majeur a créé une situation de plus en plus grave.

RÉGULARISATION DU LIT :

Les difficultés inhérentes à la navigation et la fréquence des crues de débâcle exigeaient d'urgence une intervention dans la vie du fleuve. La régularisation a eu lieu en deux étapes, d'abord pour les eaux moyennes, puis pour les basses eaux. Le projet de la régularisation aux eaux moyennes avec profil transversal constant du secteur Bratislava-Gönyü fut dressé en 1880-1881, dans le but d'assurer une profondeur de 2 m au-dessous du niveau des basses eaux ainsi que l'évacuation sans entraves des glaces. On a choisi comme niveau moyen de base celui correspondant à la hauteur d'eau de 300 cm à l'échelle de Bratislava, avec un débit de 2 886 m³/s.

La régularisation des eaux moyennes a été effectuée entre 1886-1896. Les travaux de régularisation comprenaient en premier lieu, sur les deux rives, des ouvrages parallèles en moellons (fig. 15) construits jusqu'à la hauteur du niveau des eaux moyennes, des travaux de protection des berges, des coupures, et quelques digues transversales, même la fermeture de bras secondaires (fig. 16).

La largeur de régularisation a été calculée à l'aide de diverses formules bien connues, puis modifiée sur la base de l'expérience. Ainsi donc, une largeur de régularisation de 300 m a été établie pour le secteur de grande pente, 325 m pour le secteur de transition et 380 m à l'aval du changement de pente, afin d'obliger ainsi l'eau, resserrée dans un lit uniforme, à atteindre la profondeur voulue. Le tracé du lit fut déterminé soigneusement à travers la large bande de divagations du fleuve — les principes de Fargue et de Girardon n'étant pas encore connus à cette époque — en longues droites et courbes douces, conformément à l'état des connaissances de l'époque en matière de régularisation de rivières, et en respectant rigoureusement l'économie. En créant de longs secteurs rectilignes, on voulait faciliter le passage de la glace. Au cours des travaux, 3 600 000 m³ de pierre brute furent mis en œuvre et 7 800 000 m³ de dragage ont été effectués.

Comme résultat de la régularisation, un lit principal constant s'est formé à la place de l'ancien Danube (voir fig. 2 et 4) et, de ce fait, les conditions de navigation aussi bien que celles de l'évacuation des glaces se sont considérablement améliorées. Toutefois, l'objectif original, d'assurer même à l'étiage un chenal de navigation d'une profondeur de 2 m au moins, proposé au début, n'était pas atteint.

Après l'achèvement de la régularisation aux eaux moyennes, les insuffisances de cette régularisation ne tardèrent pas à se présenter, notamment :

a) Sous l'effet du resserrement du lit, le niveau des eaux moyennes s'est relevé au début — entre 1887 et 1894 — à l'extrémité supérieure du secteur, d'environ 80-90 cm à Bratislava. Cette élévation du niveau n'a diminué progressivement qu'après 1900. Sous l'effet de l'élévation du niveau d'eau, l'exhaussement du fond du lit, du fait de la diminution de la pente, était considérable, en premier lieu dans le secteur Devin-Bratislava (du km 1880 au km 1869); donc les conditions de la navigation empiraient. Dans le secteur aval de l'exhaussement (du km 1856 au km 1838), par contre, le lit s'est mis à s'approfondir à la suite de l'accroissement de la pente, pendant qu'il a commencé à se combler intensément, sur le secteur de transition, au point du changement de pente — où les hautes eaux et les eaux moyennes peuvent s'étaler librement.

b) Le lit moyen, se composant des secteurs droits limités par des digues parallèles, s'est révélé trop large pour les eaux basses. Par conséquent, d'une part, le chenal de navigation a continuellement changé de place; d'autre part, le dépôt du débit solide concentré au lit moyen a augmenté, la migration des bancs de gravier a commencé, de mauvais passages et des étranglements de la voie de navigation se sont formés.

c) L'eau, après avoir déposé le débit solide dans le lit principal, pourrait librement passer à travers les ouvertures ménagées dans les digues parallèles, dans les bras secondaires. Donc, les ouvertures ont causé à l'étiage une perte d'eau inutile pour le lit principal, d'où une diminution du pouvoir érosif et de la profondeur.

d) Notons encore que les fermetures secondaires projetées dans les bras n'ont pas été réalisées, surtout par raison d'économie, alors que si elles avaient été construites en nombre adéquat à une

hauteur convenable, elles auraient facilité le remblayage des bras secondaires et diminué l'exhaussement du lit principal.

Les exigences sans cesse croissantes de la navigation réclamaient d'urgence de commencer la *régularisation aux basses eaux*. La régularisation aux eaux moyennes effectuée, l'application de la méthode du resserrement avec ouvrages parallèles ne se révélait pas, malgré ses défauts, vaine et inutile. Elle a permis de réaliser rapidement sur ce secteur la régularisation aux basses eaux sur la base du principe de régularisation à « profil normal variable » exposé par H. Girardon en 1894, à l'occasion du VI^e Congrès International de Navigation, à La Haye. L'idée de la régularisation aux basses eaux commencée au tournant du siècle était d'établir d'une manière convenable le tracé du thalweg en tenant compte des formes naturelles du lit, de sa profondeur, de sa pente, de ses changements de vitesse, et de fixer cette ligne de façon durable à l'aide d'ouvrages de régularisation. En même temps, les pertes d'eau du lit principal devaient être réduites de façon que son débit soit, même à l'étiage, suffisant pour la navigation. Pour donner un tracé convenable au chenal de navigation et pour le fixer, on a construit des épis (voir fig. 4). Pour réduire les pertes d'eau du lit principal, une partie des ouvertures laissées dans les digues parallèles a été fermée, et des séries de fermetures secondaires ont été créées dans les bras. Finalement, comme moyen supplémentaire, le dragage fut employé.

Le caractère spécial de la régularisation résidait dans le fait que le chenal d'étiage correspondant aux principes de Fargue et de Girardon devait être développé à l'intérieur des digues parallèles de tracé défini. D'autres difficultés résultaient de ce que les embouchures des bras secondaires d'une certaine importance devaient également être prises en considération en établissant le tracé du thalweg.

Sous l'effet de la régularisation aux basses eaux, le lit s'est développé avantageusement au point de vue de la navigation, de façon provisoire, et les conditions de la navigation se sont beaucoup améliorées.

Inutile de dire que cette régularisation ne pouvait naturellement assurer le développement de l'état d'équilibre du secteur considéré. A cette époque, on ne connaissait pas encore les facteurs sur la base desquels on aurait pu calculer les corrélations entre le débit d'eau et le charriage, à l'aide desquelles le bilan hydrologique du débit solide du Haut-Danube et les conditions du développement du lit en équilibre auraient pu être déterminées.

Après que la première guerre mondiale eut éclaté, la cadence des travaux de régularisation se ralentit et se limita jusqu'à 1927 — époque de la création d'une Commission Technique Commune hongroise et tchécoslovaque — au strict minimum nécessaire à l'entretien. Pendant l'interruption forcée des travaux, les insuffisances du système de régularisation suivi jusque-là se sont montrées; on en a tenu compte en reprenant les travaux de régularisation au niveau de l'étiage navigable déterminé par la Commission Internationale du Danube en 1932 (1).

(1) Niveau atteint ou dépassé, en moyenne, pendant 290 jours de la période de navigation de 300 jours comptée du 10 mars au 25 décembre.

17/ Schéma de principe du système modifié de régularisation aux basses eaux.

Prinzipschema des veränderten Systems der Niederwasser-Regulierung.

a) Les observations ayant montré que la profondeur d'eau n'est pas constante aux divers points des courbes, mais augmente à partir du point d'inflexion jusqu'au sommet, on envisagea de fixer la profondeur au-dessous de l'étiage navigable à 6 m aux sommets des courbes et à 3 m aux points d'inflexion (fig. 17), en supposant qu'elle varie entre les deux valeurs extrêmes suivant une sinusoïde.

b) Selon les observations, la largeur du lit mineur n'est pas non plus constante. Aux inflexions, le profil transversal est symétrique, de forme parabolique, et la largeur de régularisation de 300 m est un peu trop grande; tandis qu'au sommet les bancs de gravier déposés sur le côté convexe du lit moyen engendrent un rétrécissement allant jusqu'à 100 m. Par conséquent, il fallait procéder au rétrécissement du lit. Celui-ci atteint 100 m (c'est-à-dire 33 %) aux sommets des courbes et 30 m, soit 10 %, aux points d'inflexion; il est uniformément réparti sur les deux côtés.

c) Il paraissait utile de dresser le plan du chenal de navigation. La largeur du chenal fut fixée à 150 m et sa profondeur à 2,25 m. Les épis projetés — dont la hauteur et l'inclinaison augmentent graduellement à partir du point d'inflexion vers les sommets — ne seront construits que jusqu'au bord du chenal projeté.

Du point de vue de l'amélioration des seuils et de l'entretien du chenal de navigation, le système de régularisation modifié s'est montré efficace.

Le résultat peut être illustré par deux exemples.

Tandis que sur le secteur du km 1850 au km 1794, la navigation devait être interrompue en moyenne pendant quatre-vingt-quatre jours durant la période libre de glace au cours de la décennie de 1867-1876, elle ne fut pas arrêtée un seul jour, même en 1947, année aux eaux extrêmement basses.

L'effet de la régularisation est encore mieux illustré par un exposé de M. Horváth dans un rapport sur l'entretien du chenal de navigation dans le secteur du Danube entre Rajka et Gönyü (km 1850-1791), présenté au XX^e Congrès International de Navigation (Baltimore, 1961). M. Horváth a introduit, pour caractériser l'état de la voie navigable, l'indice d'insuffisance effective de mouillage par rapport à la profondeur de 25 dm voulue, cet indice tenant compte également de la durée d'étiage pendant laquelle le passage difficile se présente. L'indice ainsi déterminé se chiffrait, entre 1921-1944, par 1 066 dm.jour, tandis qu'entre 1946 et 1954, il n'était que de 854 dm.jour. Les débits moyens dans les deux époques considérées étaient respectivement de 2 200 et 1 960 m³/s, et la deuxième époque comprenait l'année 1947, extraordinairement pauvre en eau ($Q_{\text{moyen}} = 1\,390 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tous ces résultats n'ont amélioré que les conditions de navigation; et le problème le plus difficile du secteur considéré, l'exhaussement du lit, n'a pas été non plus résolu par cette méthode.

3. L'aménagement du Danube depuis l'année 1945.

La deuxième guerre mondiale a aussi marqué de son empreinte le bassin du Danube. Les événements militaires directs ont beaucoup limité et rendu difficile la navigation, étant donné que le fleuve était miné et que les navires avariés formaient des obstacles sérieux pour la navigation.

L'apparition périodique de mauvais passages, surtout dans les kilomètres 1804, 1805, 1806, 1807, 1810, 1811, 1827, 1829, 1830,5, 1831, 1832, 1833, 1837, 1838, témoignait du fait que, pendant la guerre, l'entretien des ouvrages de régularisation fut forcément négligé. Il en résultait des brèches dans les digues parallèles et, par suite, des pertes considérables d'eau du lit principal. Des dépôts locaux et des bancs de gravier se sont formés dans le lit. L'eau des bras secondaires, rentrant dans le lit principal et provoquant des remous locaux, a amené en amont du confluent une diminution rapide de la force tractrice et un processus de sédimentation dans quelques secteurs exposés. Dans ces conditions, les épis endommagés ne pouvaient, eux non plus, satisfaire à leur tâche. Cette situation entraînant des conséquences économiques très sérieuses, les experts hongrois et tchécoslovaques ont décidé de prendre des mesures concrètes.

Ces mesures indispensables peuvent être caractérisées de la façon suivante :

- Reconstruction des ouvrages de régularisation aux basses eaux et leur achèvement;
- Reconstruction des ouvrages de régularisation aux eaux moyennes dans certains secteurs;
- Dragage général du lit et dragage des seuils;
- Dépôt des matériaux de dragage dans les bras secondaires;
- Correction du tracé du lit principal à quelques endroits;
- Correction du tracé des levées; et construction d'épis dans le champ d'inondation.

Les travaux, qui avaient au début un caractère de reconstruction, finirent par avoir le caractère d'une activité de correction consciente de ses buts et systématique. Cette activité devait être dirigée et réglementée, et c'est pour cette raison que les gouvernements hongrois et tchécoslovaque ont renouvelé l'activité de la Commission Technique Commune hongroise et tchécoslovaque, qui est toujours en fonction.

La Commission a discuté les différentes études théoriques et expérimentales qui ont servi de base à la préparation du nouveau «Projet global de régularisation du secteur à passages difficiles du Danube hongrois-tchécoslovaque» terminé en 1950.

Dans ce projet, les experts des deux pays ont démontré la nécessité d'un aménagement planifié du secteur commun du Danube, du point de vue économique et technique, en liaison étroite avec les divers travaux de régularisation effectués au cours des années de 1898 à 1950.

Ce projet global devrait être pris pour base des autres projets ultérieurs plus détaillés. Etant donné cependant que l'on compte exploiter l'énergie hydraulique de ce secteur, on ne pouvait pas développer et réaliser les propositions originales dans toute leur étendue, et par là on a réduit à la mesure indispensable les travaux exécutés dans le lit moyen et dans le chenal d'étiage.

Leur importance ressort du tableau V.

Les niveaux d'étiage observés au cours des années 1951 et 1952, puis les expériences acquises pendant la crue de 1954 et les études effectuées dans cette période ont cependant reporté de nouveau l'attention vers l'exhaussement du lit. Vu que le problème a acquis une importance croissante, il a imposé un changement de conception de la régularisation. Dès le début des travaux de régularisation, on a formulé l'exigence essentielle d'assurer une navigation permanente et sans interruption. Cette exigence a soulevé, entre autres problèmes urgents, avant tout celui de trouver le moyen d'assurer une stabilité permanente au profil en long.

On a constaté de nouveau que les causes du dépôt de sédiments étaient les suivantes :

- a) le changement brusque de la pente à Palkovičovo (km 1810), comme suite auquel la force tractrice diminue subitement;
- b) dans le secteur de Rajka-Palkovičovo (km 1850-1810), le lit majeur est trop large. Il en résulte une sédimentation accrue des suspensions dans la période de crues, et un exhaussement permanent du terrain inondé;
- c) les vastes forêts situées dans le champ d'inondation contribuent aussi à la diminution de la vitesse de l'eau, favorisant ainsi la sédimentation;

- d) pour assurer la navigation sans interruption, on a été obligé d'augmenter la hauteur des digues parallèles ainsi que des fermetures des bras secondaires, suivant l'exhaussement du fond du lit. En conséquence, la masse des matériaux solides passant dans les bras a diminué; la concentration des eaux moyennes dans le lit principal n'était cependant pas assez forte pour augmenter suffisamment la force tractrice et favoriser le morcellement du débit solide.

Dans ces conditions, on a supposé avec raison que, dans quelques décennies, le Danube aura son lit surélevé.

Ces circonstances ont eu, par l'infiltration intensifiée des eaux, une influence néfaste sur les terrains environnants, terrains importants du point de vue agricole. On a proposé par la suite :

- 1° d'enlever, par dragage, approximativement 1 million de m³/an du matériau solide du lit entre les km 1837 et 1810;
- 2° de couper le sous-bois au voisinage des rives du lit principal et de renforcer ainsi la force tractrice de la crue;
- 3° d'effectuer les études complexes relatives au mouvement et à la répartition des matériaux solides dans la section transversale;
- 4° de chercher les moyens d'utiliser les matériaux du dragage pour les travaux de régularisation ainsi que pour d'autres buts;
- 5° d'effectuer, en dehors des recherches complexes hydrologiques, des études sur modèle réduit (fig. 18) dans les conditions suivantes :
 - a) les quantités de matériaux dragués, pendant cinq années, atteindront 5 millions de m³,
 - b) des digues d'épis seront construits dans le champ d'inondation,
 - c) le sous-bois sera coupé, rendant libre une largeur de 300 m pour l'écoulement des crues,
 - d) certains bras secondaires seront liquidés.

Depuis 1954, l'activité de régularisation a augmenté et les mesures énumérées ont été en partie réalisées. Le tableau VI en donne les caractéristiques.

Parallèlement aux travaux mentionnés, le projet de créer un lit uniforme et stable a pris forme. Des études considérables doivent précéder son établissement. Les problèmes suivants restaient toujours à résoudre :

- la régularisation du lit principal;
- l'amélioration des passages difficiles;
- la suppression de l'écoulement dans les bras secondaires;
- l'aménagement du champ d'inondation;
- la collecte ininterrompue des données d'observation et la continuation des recherches.

4. Les perspectives des travaux de régularisation.

Dans la suite, on envisage de réaliser la formation d'un lit principal unifié.

Celui-ci mettrait en harmonie l'écoulement des crues et des eaux moyennes, et assurerait l'évacuation sans entraves des glaces. Les interventions techniques en vue de cette réalisation doivent être projetées de façon qu'elles soient en harmonie avec les ouvrages de régularisation déjà construits. On doit avoir soin de poursuivre, simultanément avec les travaux de régularisation du lit majeur, ceux de régularisation aux basses eaux.

18/ Modèle à l'échelle réduite d'un secteur du Haut-Danube au laboratoire d'hydraulique de l'Institut de Recherches des Ressources Hydrauliques à Budapest.
Modell eines Abschnitts der Oberen Donau in der Versuchsanstalt für Hydraulik des Forschungsinstituts für Wasserwirtschaft Budapest.

a) Dans le lit moyen, ce sont les interventions suivantes qui aideraient à ménager les conditions de l'écoulement :

La tâche primordiale est d'égaliser les débits le long du profil en long, d'empêcher les pertes d'eau affectant le lit au droit de la sortie des bras. Ceci pouvait se faire en premier lieu en fermant progressivement les systèmes de bras.

Cette exclusion progressive des bras secondaires du transport de l'eau faciliterait beaucoup l'amélioration des conditions de pentes. Il faut cependant souligner le fait qu'en formant la ligne unifiée de la rive et en fermant les bras secondaires, l'amé-

19/ Plan de situation indiquant le creusement au confluent d'un bras secondaire et du lit principal.

Lageplan der Vertiefung am Zusammenfluss eines Nebenarms mit dem Hauptbett.

nagement des conditions de pentes les plus avantageuses ne se réalise pas encore. Dans cette question, un rôle important est dévolu aux crues dépassant $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ étalées jusqu'ici, car il faut assurer également leur écoulement sans qu'elles occasionnent des relèvements nuisibles du plan d'eau. Ainsi l'on peut arriver à prévenir le dépôt nuisible du débit solide en suspension. Un aménagement favorable des conditions de pentes dépend pour beaucoup d'un rythme adéquat des travaux d'intervention, ce qui nécessite l'étude continue du problème.

Le succès de l'aménagement des conditions d'écoulement et des pentes influencerait fort celles du transport du débit charrié dans le secteur.

La part prépondérante du charriage s'effectue dans le domaine des eaux moyennes. Près de 70 % de la matière charriée annuellement est transportée par les débits de $1\,000\text{--}3\,400\text{ m}^3/\text{s}$ correspondant aux niveaux de 190-530 cm à l'échelle de Bratislava. Donc, le transport de matériaux par des débits inférieurs à $3\,400\text{ m}^3/\text{s}$ est à celui des débits supérieurs à cette quantité à peu près dans le rapport de deux à un.

Dans la situation présente, la capacité de transport du lit principal diminue du fait des pertes d'eau se produisant vers les bras secondaires, et une partie de la matière transportée se dépose dans le lit principal. En amont des points de réembouchure des bras, les vitesses diminuent du fait du remous dû à l'accroissement du débit, et des dépôts de matières transportées se produisent.

L'effet des bras secondaires esquissé dans ce qui précède peut être évité en supprimant les systèmes de bras, mais, ce faisant, nous rendrons seulement plus uniforme la répartition de la matière se déposant sur le secteur et retarderons ainsi considérablement l'exhaussement de certaines parties du secteur. On voit que ce mode d'intervention n'arrête point à lui seul le processus d'exhaussement du secteur, car le transport du débit solide du secteur tout entier est déterminé par la capacité de transport des profils de Bratislava et de Medvedov.

b) Les interventions visant la formation favorable du lit des eaux moyennes entraînent et rendent nécessaire la formation — en harmonie avec les conditions nouvelles du lit moyen — du lit majeur uniforme. Sans la régularisation de l'écoulement des crues, il n'est guère possible d'entretenir le lit des eaux moyennes et le champ d'inondation.

On se propose de réaliser le tracé favorable du lit majeur en premier lieu, avec une végétation adéquate des champs d'inondation, par des « digues vivantes ». Celles-ci poursuivent deux buts. En premier lieu, elles assureraient le tracé uniforme des champs d'inondation; par ailleurs, les raccordements transversaux s'embouchant à elles neutraliseraient les parties se trouvant à l'ombre au point de vue de l'écoulement et favoriseraient leur remblayage.

La concentration des débits de crue doit s'effectuer progressivement et avec circonspection, car sans cela nous pourrions influencer d'une façon dangereuse les niveaux des crues.

Toutefois, la formation favorable et définitive de nouvelles conditions d'écoulement ne peut être espérée qu'après l'achèvement des deux étapes de travaux exposés ci-dessus et exécutés en pleine harmonie.

Les opinions des experts s'accordent sur les principes fondamentaux de l'aménagement général, mais les idées concernant les interventions pratiques sont encore divergentes jusqu'à présent.

Un groupe d'experts affirme que l'effet des interventions projetées sur le secteur du Danube entre Rajka et Medvedov (km 1850-1805) sur les caractéristiques géométriques du tracé n'est pas tellement considérable qu'il puisse influencer sur le rôle du processus géologique, cause principale de l'exhaussement et de la rupture de pente à Palkovičovo. Ils estiment que d'autres interventions sont encore nécessaires pour résoudre la question et citent en premier lieu le rétrécissement du lit à l'aval de la rupture de pente. De telles interventions aideraient à faire avancer le débit solide, et ainsi il deviendrait possible de supprimer sur le secteur en question les travaux de dragage, et limiter ceux-ci exclusivement à l'entretien du chenal de navigation aux basses eaux. Ils motivent cette façon de procéder par le caractère double du Danube supérieur. Ils voudraient réaliser l'équilibre du secteur divisé par des systèmes de bras à l'aide des procédés exposés.

Sur le secteur à l'aval de la rupture de pente, à Palkovičovo (km 1810), où il s'est formé dès maintenant un large lit d'eaux moyennes plus ou moins unifié — un champ d'inondation exempt de branches — on se propose de donner par des remblais de gravier et des ouvrages parallèles un alignement uniforme aux rives d'une hauteur correspondant au débit d'environ 3 000 m³/s. C'est en adoptant les dimensions géométriques et la forme les plus avantageuses pour le lit, que l'on croit pouvoir mettre en mouvement progressivement le débit solide se déposant sur ce secteur et le transporter plus loin à un point où le dragage des dépôts concentrés peut se faire dans des conditions plus avantageuses.

L'autre groupe d'experts estime que la tâche peut être résolue en aménageant de façon adéquate les rives concaves et en concentrant le débit par une conformation judicieuse des rives convexes, et n'attribue guère d'importance aux conséquences

hydrauliques, géologiques et morphologiques de la rupture de pente à Palkovičovo. Ce groupe croit que le rétrécissement du lit des eaux moyennes est réalisable par la voie naturelle en corrigeant le tracé et en aménageant les rives concaves, et en partie convexes, entrant en ligne de compte. Ils supposent qu'à la suite des interventions ainsi exécutées, les travaux de dragage peuvent être réduits au minimum. Pour l'avenir, on tient compte du fait qu'à la suite de l'aménagement des chutes du secteur autrichien, le débit solide du Danube diminue progressivement.

Les deux conceptions tendent à modifier entièrement la force tractrice du fleuve. Toutefois, la solution de cette question exige de poursuivre les observations, les recherches et les travaux en laboratoire.

Nous avons montré que la question la plus délicate de la régularisation du secteur, à savoir la méthode de modification de la force tractrice, est inconnue à ce jour. La divergence des opinions s'explique par le fait que le secteur en question est, du point de vue de la régularisation, le plus délicat après celui des Portes de Fer.

Les interventions régulatrices jusqu'ici effectuées — et qui se sont appuyées sur des travaux de calcul et d'observation très approfondis — ne pouvaient pas résoudre le problème. Ceci s'explique en premier lieu par le fait que les événements de la première guerre mondiale ont empêché la continuation, et l'achèvement des travaux de régularisation de grande envergure exécutés au tournant du siècle. Dans la période subséquente, jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale, la situation économique ne permettait pas l'étude complexe des problèmes de régularisation du secteur, et encore moins l'exécution des travaux de grande envergure dont ces études auraient démontré la nécessité. Les travaux exécutés à cette époque servaient en premier lieu à assurer la profondeur de navigation voulue, ce en quoi ils ont d'ailleurs relativement bien réussi.

Actuellement, les phénomènes exposés dans ce qui précède imposent cependant d'effectuer avec circonspection des interventions bien étudiées.

Les travaux et études préparant cette intervention de grande envergure, dont les experts s'occupent depuis plusieurs années et dont nous venons d'exposer les buts, peuvent fournir une base solide à la solution des tâches complexes de la régularisation.

Il faut remercier les experts des travaux hydrauliques des deux Etats riverains d'avoir effectué durant de longues années, de commun accord, leurs observations et recherches.

Par ces travaux, ils ont fourni des données de grande valeur pour effectuer des interventions en vue de modifier les processus naturels. Nous voudrions espérer que les résultats de ce travail contribueront à élargir et enrichir les connaissances théoriques et pratiques de la régularisation des rivières.

Bibliographie.

- S. FEKETE. — Die Regulierung der Ungarischen Oberen Donau. Budapest, 1899.
E. de KVASSAY. — Le Danube international. Budapest, 1916.

- Z. KAROLYI. — Résultats provisoires des études relatives au charriage de débit solide du Haut-Danube (en hongrois, avec résumés en allemand et en russe). *Vizügyi Közlemények (Revue d'Hydraulique)*, Budapest, n° 1, 1951.
- K. TÖRY. — Le Danube et sa régularisation (en hongrois). *Edition de l'Académie des Sciences*, Budapest, 1952.
- S. HORVATH. — La voie navigable du Danube et la Hongrie (en hongrois, avec résumés français, russe et allemand). *Vizügyi Közlemények (Revue d'Hydraulique)*, Budapest, n° 4, 1954.
- K. TÖRY. — Les conditions des glaces et des seuils des voies navigables de Hongrie (en hongrois, avec résumés français, russe et allemand). *Vizügyi Közlemények (Revue d'Hydraulique)*, Budapest, n° 3, 1956.
- O. RUZICKA. — Etude sur les travaux de régularisation du Danube (en tchèque). *Edition SVH*, Bratislava, 1956.
- I. ZILINCAN. — Etude sur le secteur de passages difficiles du Danube (en slovaque). Bratislava, 1958.
- S. HORVATH. — Maintenance of navigation channel over the shallow stretch of the Danube river between the villages Rajka and Gönyü (avec résumé français). *XXth International Navigation Congress*, section I, question 5. Baltimore, 1961.
- J. SZOLGAY. — Nouvel aspect du rehaussement de la partie supérieure du secteur hongrois-tchécoslovaque du Danube eu égard aux recherches relatives au débit solide charrié et en suspension (en slovaque). *VUV*, Bratislava, 1962.
- J. CSOMA et J. SZILAGYI. — Résumé et critique des études relatives à la régularisation du Haut-Danube (manuscrit en hongrois). Vituki, 1962.

Zusammenfassung

Die Probleme der Materialablagerung im Bette der Donau zwischen Devin und Szob

Von J. Furdick * und K. Stelczer **

Durch das Tor von Devin in den Karpethenbecken tretend teilt sich die Donau auf eine für die Mündungsstrecke kennzeichnende Weise in viele Arme und bildet an der etwa 60 km langen Strecke zwischen Bratislava und Gönyü eine wahrhaftige Inselwelt. Infolge der Verbreitung und des geologisch bedingten Gefällebruches legt sie hier den grössten Teil ihres geschleppten Geschiebes ab. Die Verbreitung des Flusses und der grosse Geschiebeanfall war immer, und ist noch heute ein grosses Problem für die Ingenieure.

In der Mitte des vorigen Jahrhunderts wurde zuerst die Verbreitung des Hochwassers durch Bau von Hochwasserschuttdämmen aufgehoben. Später, in den Jahren von 1886 bis 1896 wurde zwecks Sicherung eines der Schifffahrt geeigneten einheitlichen Flussbettes durch Errichtung von Bruchsteinparallelwerken die Mittelwasserregulierung mit ständigen Querschnitten durchgeführt.

Dank der Hochwasserschuttdämmen konnten mächtige Gebiete vom Hochwasser geschützt werden, da aber die Hochwasser sich nunmehr nicht unbehindert verbreiten konnten, legten sie das Geschiebe in dem verhältnismässig engen Vorland ab. Die Verlandung erreichte 1-2 cm pro Jahr, und rasch bildete sich ein Hangbett aus.

Infolge der Mittelwasserregulierung bildete sich ein ständiges Hauptbett aus, so dass die Verhältnisse der Schifffahrt wie auch die der Eisabfuhrung verbessert wurden, doch konnte man die Betterhöhung und die damit verbundene ständige Umtiefewanderung nicht verhindern.

Die stets zunehmende Ansprüche der Schifffahrt drängten zur Niederwasserregulierung. Die zur Zeit der Jahrhundertwende begonnene Niederwasserregulierung wurde auf Grund des im Jahr 1894 von Girardon an dem Navigationskongress in Haag bekanntgegebenen Prinzips "Regulierung mit änderlichem Normalprofil" durch Errichtung von Sporenbauten durchgeführt.

Mit der Niederwasserregulierung verbesserten sich zwar wesentlich die Navigationsverhältnisse, jedoch die technischen Eingriffe konnten das Problem der Betterhöhung nicht endgültig lösen. Die Lösung des Problems des sich ständig erhöhenden Dunaubettes und Vorlandes wartet noch auf die Ingenieure unserer Tage. Zur raschen und endgültigen Lösung des Problems drängt die Tatsache, dass auf der verlandenden Strecke infolge der verhältnismässig immer niedriger werdenden Hochwasserschuttdämmen die Hochwassersicherheit immer kleiner wird, die landwirtschaftlich benützten Gebiete des Ueberschwemmungsgebietes sich immer mehr versumpfen und die Kosten ihrer Entwässerung immer mehr betragen.

Im Interesse der Lösung des Problems wurde in den vergangenen Jahrzehnten eine ganze Reihe von Serienmessungen an Ort und Stelle durchgeführt, um die hydrologischen Kennwerte um so tiefer aufschliessen zu können. Es wurde auch das Kleinmodell der interessierten Strecke im Massstabe 1:2 000 horizontal und 1:150 vertikal gefertigt. Im Sinne des von dem Ungarisch-Tschechoslowakischen Gemeinsamen Technischen Komitee angenommenen Regulierungsprinzip wurde mit Berücksichtigung der bisherigen Eingriffen und deren Wirkung die Ausbildung eines einheitlichen Hauptbettes zum Ziel gesteckt. Mit der Ausbildung eines einheitlichen Flussbettes soll die weitere Verbreitung des Hochwassers verhindert, die Schleppkraft des Flusses vergrössert und damit die Möglichkeit einer weiteren ungünstigen Ablagerung behoben werden. Das Geschiebe muss sich dann auf einem geeigneten Ort / wie z.B. bei einer zu bauenden Betonfabrik/konzentriert ablagnern.

Solange die Flussregulierung durchgeführt wird, soll die weitere Betterhöhung mit Baggerung von jährlich 1 000 000 m³ Kiesel eingeschränkt werden.

* Ing., Director des Forschungsinstituts für Wasserwirtschaft, Bratislava (Tschechoslowakei).

** Direktor der Forschungsanstalt für Wasserwirtschaft, Budapest (Ungarn).

TABLEAUX

I. — Le débit du Danube dans les différents profils en pour cent du débit passant par Bratislava

SECTION DE JAUGEAGE (km)	DATE DU JAUGEAGE ET DÉBIT TOTAL A BRATISLAVA				
	17-1-1961	21-9-1960	20/22-6 1961	16/17-5 1961	13/14-7 1955
	1 005 m³/s	1 958 m³/s	2 998 m³/s	4 002 m³/s	6 702 m³/s
1869,04	100	100	100	100	100
1860,00	92	89	92	92	65
1851,63	79	81	88	89	87
1847,85	84	95	85	70	58
1842,40	99	97	83	68	50
1833,10	76	74	62	65	48
1825,00	88	96	78	67	53
1821,07	65	82	66	51	40
1816,85	84	84	76	64	50
1810,40	99	85	68	63	43
1806,00	99	99	89	92	73
1802,37	99	99	90	90	75

II. — Débits caractéristiques du secteur hongrois-tchécoslovaque du Danube

PROFIL	km	SUPER-FICIE DU B.V. en 1 000 km²	DÉBITS (m³/s)		
			Minimal	Moyen	Maximal
Bratislava.	1870	131	570	2 025	10 900
Dunaremete.	1826	131	570	2 025	9 600
Gönyü.	1791	150	583	2 105	8 800
Komárno-Komárom.	1768	170	605	2 295	8 900
Confluent du Hron.	1716	173	613	2 350	8 700
Confluent de l'Ipel-Ipoly.	1708	178	615	2 375	8 900

III. — Vitesse moyenne dans le lit principal, en m/s

DÉBIT A BRATISLAVA (m³/s)	SECTION DE L'ÉCHELLE DE		
	Rajka	Dunaremete	Medvedov
	km 1848	km 1826	km 1806
10 000	3,42	2,35	1,83
9 000	3,07	2,32	1,76
8 000	2,90	2,29	1,68
7 000	2,76	2,26	1,59
6 000	2,65	2,23	1,54
5 000	2,53	2,21	1,47
4 000	2,43	2,15	1,42
3 000	2,24	2,09	1,39
2 000	2,08	1,97	1,36
1 240	1,68	1,49	1,23

IV. — Le transport de débit solide en suspension dans le profil, au km 1876

ANNÉE	DÉBIT LIQUIDE MOYEN ANNUEL A BRATISLAVA (m³/s)	TURBIDITÉ MOYENNE ANNUELLE (g/m³)	TRANSPORT MOYEN ANNUEL EN SUSPENSION (kg/s)	MASSE TOTALE DES MATÉRIEAUX EN SUSPENSION (millions de t/an)
1933	1 793	118,60	212,77	6,71
1934	1 412	73,20	103,05	3,25
1936	2 042	105,10	214,99	6,78
1952	1 804	56,30	163,51	5,17
1953	1 817	71,60	199,50	6,29
1954	1 977	67,70	232,60	7,31
1955	2 417	74,16	276,50	8,72
1956	2 065	73,43	260,90	8,25
1957	2 185	83,24	271,20	8,55
1958	2 087	69,55	239,46	7,55
1959	2 018	78,60	250,90	7,91
1960	1 841	41,47	79,10	2,49
Moyenne	1 955	75,41	208,71	6,58

V. — Quelques données relatives aux travaux de régularisation exécutés sur le secteur hongrois-tchécoslovaque du Danube entre 1946 et 1954

ANNÉE	PIERRES UTILISÉES (m³)	REVÊTEMENTS EXÉCUTÉS (m²)	DRAGAGES EFFECTUÉS (m³)
1946	13 631	—	—
1947	25 640	—	—
1948	45 827	—	—
1949	42 461	22 481	85 536
1950	53 973	18 056	8 660
1951	54 196	22 503	66 738
1952	57 169	4 176	264 659
1953	53 331	6 932	339 284
1954	55 741	331	203 819

VI. — Quelques données relatives aux travaux de régularisation exécutés depuis 1955

ANNÉE	PIERRES UTILISÉES (m³)	REVÊTEMENTS EXÉCUTÉS (m²)	DRAGAGES EFFECTUÉS (m³)
1955	57 245	1 290	698 959
1956	41 764	223	639 678
1957	42 956	2 607	915 781
1958	62 169	8 805	1 180 686
1959	70 807	1 556	1 085 781
1960	57 306	2 116	1 256 762
1961	56 059	6 820	1 545 631