LE DANUBE EN YUGOSLAVIE

PAR
B. KNEŽEVIĆ *

C'est sur le secteur yougoslave que le Danube reçoit ses grands affluents, la Drave, la Theiss et la Save, qui portent son débit au double et améliorent ainsi dans une mesure décisive les conditions de navigation en basses eaux. Fixer les rives peu résistantes et empêcher l'élargissement du lit du fleuve, avec détermination des largeurs optimales, constituent la tâche fondamentale de la régularisation de certains tronçons du fleuve isolés et de courte longueur. La première partie de ce rapport comporte un sommaire des récentes analyses hydrologiques et morphologiques de ce secteur.

Le Danube y traverse la partie la plus basse de la plaine pannonienne, où avec ses affluents, il menace d'inondations plus de 600 000 ha. D'importants travaux de défense de ces terrains contre les inondations et de leur assèchement furent entrepris au cours des 150 dernières années. Il s'est avéré cependant que le système d'améliorations existant avait de grands inconvénients, qu'il s'agit d'écarter pour créer des conditions meilleures pour l'agriculture et l'industrie. Après des études très poussées, le projet du système hydraulique Danube-Theiss-Danube a été élaboré et approuvé. Il résout d'une manière sûre le problème de l'évacuation des eaux intérieures d'une superficie de plus de 1 million d'hectares et l'irrigation de 360 000 hectares. De plus, ce système de canaux accroît de plus de 25 % la longueur des voies navigables en Yougoslavie. Depuis 1958, le système est en pleine construction et son achèvement est prévu pour l'année 1966.

Le secteur commun roumano-yougoslave des Portes de Fer, connu par ses cataractes, a été l'objet d'importants travaux de régularisation, effectués de 1889 à 1900 et complétés dans la période 1926-1940, dans le but de rendre possible une navigation régulière. Une revue de ces travaux est donnée à la suite. Le secteur est surtout important par

les possibilités d'utilisation de sa puissance hydraulique, où, pour une chute d'environ 34 mètres, on peut obtenir une énergie annuelle de plus de 10 milliards de kWh. En vertu d'une convention générale sur l'aménagement de ce secteur, une Commission d'experts roumains et yougoslaves a été formée pour l'étude des problèmes techniques, dont il est également question dans cet article.

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES ET MORPHOLOGIQUES

Une des caractéristiques principales hydrologiques et hydrauliques du secteur yougoslave du Danube est qu'il est constamment sous l'influence de ses affluents, de sorte que, sur toute son étendue, le régime uniforme stationnaire ne règne qu'exceptionnellement. Cet état du fleuve exige une analyse soignée non seulement des courbes de débit du point de vue des remous et dépressions possibles, mais également une étude sous plusieurs aspects de la genèse des crues, qui peuvent provenir de la coïncidence sur plusieurs cours d'eau au voisinage de Belgrade. Si on y ajoute la proximité de la Drina, dont les crues dangereuses, de 10 400 m³/s, atteignent la valeur des crues du Danube observées en amont de Belgrade, on voit clairement l'extraordinaire complexité des problèmes hydrologiques sur le secteur yougoslave du Danube.

Remous et dépressions.

Pour donner une idée de l'effet du remous dans le Danube, la figure 1 indique la ligne d'eau pour les dates choisies, où les rapports des débits de la Save, de la Theiss et du Danube sont différents. Le diagramme montre que, pour un même débit sur le secteur amont du Danube (la hauteur d'eau à Bogojewo est constante), les hauteurs d'eau dans la zone influencée à Slankamen peuvent varier d'une quantité allant jusqu'à 3 m sous l'effet de la Theiss.

* Ancien professeur à la Faculté de Génie civil, Belgrade.

1/ Valeurs différentes du remous provoqué par la Theiss.
Die verschiedenen Werte des durch die Theiss hervorgerufenen Rückstauss.

Djerdap (Portes de Fer).
Djerdap (Eisernes Tor).

2/ Effet de l'endiguement des terrains inondés sur la rive gauche du Danube.
Die Auswirkung der Eindämmung der Ueberschwemmungsgebiete auf das linke Ufer der Donau.

3/ Probabilité des débits dans les stations caractéristiques.
Probabilität der Wasserführung bei den charakteristischen Messstationen.

Pour la détermination de la longueur des remous, nous avons appliqué une méthode graphique approximative [3], qui consiste à établir des pentes dans les secteurs successifs du fleuve pour divers rapports entre les débits de la Theiss et du Danube. L'effet du remous disparaît là où l'on obtient l'*uniformité* des pentes.

De ces diagrammes et des analyses faites, on peut conclure que la distance à laquelle s'étend le remous provoqué par les affluents atteint sur le Danube environ 120 km. Cependant, sur 40 km, l'effet maximal est en moyenne d'environ 30 cm et ne dépasse cette grandeur que dans quelques cas extrêmes.

Une courbe typique des débits a été dressée pour Novi Sad [6]; elle est nettement multiforme en fonction du rapport du débit de la Theiss à celui du Danube.

Vitesse de propagation

La vitesse de propagation de l'onde des crues sur ce secteur yougoslave complexe ne peut être analysée en suivant le sommet de l'onde, à cause des perturbations provenant des affluents. Elle a été déterminée à l'aide de l'analyse des pentes en écoulement non stationnaire.

$$J = J_0 + \frac{\partial h}{\partial s} \approx J_0 + \frac{\partial h}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial s} \approx J_0 + \frac{1}{w} \frac{\partial z}{\partial t}$$

Ici J et J_0 désignent les pentes en écoulement varié et uniforme, z la hauteur d'eau, et w la vitesse de propagation de l'onde. Par l'analyse des données [3], on obtient un diagramme montrant que la vitesse moyenne de propagation est d'environ 100 km/jour, alors que son maximum a lieu pour les hauteurs d'eau moyennes.

La valeur de la vitesse de propagation de l'onde est utile pour la transformation du débit d'une station à une autre, ainsi que pour la solution d'une série de problèmes en relation avec la propagation de l'onde.

Influence de la protection des terres exposées aux inondations

Dans le bassin hydrographique du Danube en Yougoslavie, il y a encore des régions soumises à l'inondation en hautes eaux. Leur endiguement aura certainement une influence sur le rehaussement des crues, bien qu'il soit également certain que le rythme accéléré prévu pour la construction de réservoirs dans les bassins hydrographiques des affluents du Danube en Yougoslavie agira, dans une certaine mesure, dans le sens de l'égalisation des eaux.

Il est intéressant d'envisager ici les conséquences des deux plus grands endiguements, dont l'un est achevé et l'autre attend sa réalisation.

Le marais de Pančevo, principal fournisseur agricole de Belgrade, a été endigué de 1932 à 1935. La superficie protégée est de 32 000 ha et elle recevait auparavant jusqu'à 700 millions de m³ d'eau. Hors de l'étude de cet aménagement, deux opinions très différentes se sont faites quant à la grandeur du remous des eaux qu'il allait produire; même aujourd'hui, il n'est pas possible de répondre à cette question avec toute la précision désirable. Dans une étude [2], cette question a été traitée en comparant les fonctions de corrélation avant et après les tra-

vaux d'endiguement sur sept tronçons d'une longueur totale de plus de 200 km. De cette étude détaillée, il ressort que le remous maximal s'élevait à 1,34 m. C'était aussi l'ordre de grandeur donné par les calculs préalables, bien que la répartition le long du cours d'eau diffère un peu (fig. 2).

Le deuxième grand champ d'inondation est la vallée basse de la Lonia, près de Zagreb, qui a 100 000 ha, avec une capacité de retenue de plus de 2 milliards de m³. L'endiguement de cette zone produirait à Belgrade une augmentation de 880 m³/s de la crue maximale [5, 7].

Cette valeur est obtenue à l'aide de la courbe des volumes construite préalablement et, par voie de transformation, de toutes les ondes de crue réellement observées pour la zone endiguée [7]. Le fait suivant mérite d'être signalé: à la sortie de la plaine de Lonia (à environ 500 km en amont de Belgrade) l'onde augmentée de la Save est limitée au maximum actuel de 3 000 m³/s par l'effet de quelques retenues. Cependant, comme l'onde observée à Lonia en 1940 a un sommet plus petit que 3 000 m³/s, elle ne serait pas retenue et parcourrait inaperçue le cours supérieur de la Save, pour produire à Belgrade une onde catastrophique, parce que, dans ces nouvelles conditions, elle coïnciderait avec les hautes eaux du Danube venant de Hongrie [7].

L'endiguement d'autres retenues est, par ses conséquences, de moindre importance pour le régime du Danube.

Hautes et basses eaux

Les valeurs caractéristiques des débits extrêmes sont représentées dans l'échelle de probabilité de Galton pour les stations limnimétriques caractéristiques [5]; et sur ce diagramme, on peut lire les éléments pour chaque période de retour (fig. 3). Il est curieux de noter sur la Drina de très forts débits qui ne concordent pas avec la différence des stations sur la Save, situées en aval et en amont du confluent de la Drina. Également, les hautes eaux de la même période de retour ne coïncident pas; pourtant, l'énorme différence qui existe indique un grand étalement des ondes de la Drina dans son trajet inférieur. Ce fait est confirmé par le calcul.

En ce qui concerne les crues millénaires ou dix-millénaires, il est très caractéristique qu'elles dépassent de 63 cm au plus les crues maximales centenaires observées sur le Danube.

Comme la crête des digues longitudinales du Danube dépasse en règle générale les plus hautes eaux observées, le critère de surélévation des digues — pour les vagues dues au vent d'environ 1 m — est bien mesuré.

La question de la coïncidence des hautes eaux est de la plus grande importance dans la zone de Belgrade. Très frappant est l'exemple de 1940, où les plus hautes eaux observées ont été dépassées de 50 cm (causant de grandes inondations) bien que les débits d'aucun des affluents, ni du Danube même, ne fussent plus grands que les années précédentes. L'enveloppe des hautes eaux indique clairement que la Theiss a coïncidé avec le Danube juste au sommet, ce qui n'avait jamais été observé auparavant [5, 6].

L'analyse de la genèse des hautes eaux dans cette zone complexe montre plus clairement quelles eaux, et avec quelle valeur, provoquent une inondation [6]. Ce diagramme donne en même temps la ré-

4/ Probabilité des hautes eaux qui causent les inondations.

Probabilität der Hochwasser, die Ueberschwemmungen verursachen.

5/ Composition granulométrique du lit et des matériaux en suspension.
Kornaufbau des Sohlenmaterials und der Schwebstoffe.

ponse sur la probabilité des différents composants du débit et de leur somme résultante.

Par suite d'endiguements successifs, les crues du Danube ont été, au cours des 150 dernières années, en progression continuelle, mais on peut espérer que, comme suite à l'aménagement de bassins d'accumulation, cette tendance sera enrayée.

Débit solide

Le Danube se range parmi les fleuves qui sont peu chargés de matières solides. Le lit du fleuve est constitué de sables et, de la frontière hongroise jus-

qu'au confluent de la Morava, de sables très fins, dont la composition granulométrique typique est donnée sur la figure 5. La granulométrie des matériaux transportés en suspension est également présentée sur le même graphique.

On voit que le matériau du lit contient un certain pourcentage de fractions du débit solide qui peuvent se trouver également en suspension. Dans un tel cas, il est difficile de parler de charriage, les couches près du fond se trouvant prises dans un mouvement complexe appelé mouvement de charriage en suspension, dans lequel les grains perdent par moments le contact avec le fond, pour le rétablir au bout de courtes interruptions. Le mouvement en dunes apparaît comme inéluctable avec une pareille composition du fond du lit. La hauteur des dunes est habituellement de 50 à 80 cm, et leur longueur de l'ordre de 5 à 10 m. Un aspect particulier du mouvement des sables est représenté par le déplacements des bas-fonds et des bancs de sable. D'après des changements topographiques près de Belgrade, on a constaté qu'ainsi se déplacent annuellement 200-300 000 m³ de matériaux.

D'après de nombreuses mesures faites avec un bathymètre du type Joukovsky, on a trouvé une répartition à peu près uniforme le long d'une verticale pour le débit solide en suspension. Pourtant, les mesures avec un turbidimètre photoélectrique indiquent une augmentation sensible de la concentration près du fond.

Les grands affluents que le Danube reçoit sur le territoire yougoslave, la Drave, la Theiss et la Save, ne changent pas le caractère du débit solide du Danube, vu qu'ils transportent un débit solide de composition semblable. Dans certains secteurs, apparaît une succession caractéristique de graviers et de sables. Les graviers proviennent de couches plus anciennes et sont en général immobiles.

Le bassin versant de la Morava est soumis à une érosion très intense, de telle sorte qu'elle apporte au Danube d'énormes quantités de matériaux en suspension et charriés. La charge totale est de l'ordre de 10 à 15 millions de tonnes par an; les matériaux charriés en représentent un pourcentage élevé leur diamètre moyen étant de 7 à 10 mm.

La présence de grandes quantités de gros matériaux change presque entièrement le caractère du Danube en aval de l'embouchure de la Morava. Le lit du fleuve est composé principalement de graviers de différentes grosseurs. Les pentes locales du fleuve sont notablement plus grandes que dans les parties amont (10 à 12 cm/km). Des bas-fonds apparaissent, les plus connus étant ceux de Brzà Vrbà, qui n'ont été régularisés que dans les dernières années, grâce à de vastes travaux. La capacité de transport normale devient presque cinq fois plus grande que dans les parties en amont de l'embouchure de la Morava, et diminue lentement, de manière à se rapprocher des valeurs premières quelque part près de l'entrée du défilé des Portes de Fer, où le caractère du lit change entièrement.

Principales caractéristiques morphologiques du fleuve

On donne dans cette partie de l'article les extraits des analyses faites pour les besoins de la navigation à l'Institut des Eaux « Jaroslav Černi », de Belgrade. Il s'agit du secteur du Danube depuis la frontière hongaro-yougoslave jusqu'aux Portes de Fer.

Les profondeurs d'eau dans cette partie du Danube sont en général toujours suffisantes pour la navigation, mais il est cependant nécessaire de supprimer certains obstacles qui peuvent être classés suivant leur degré d'importance. On peut se rendre compte du genre de ces obstacles dans l'aperçu qui suit :

- obstacles présentant un danger pour la sûreté de la navigation, causés par des courbures de petit rayon, de faible visibilité, par des hauts-fonds rocheux, par les tourbillons dans les zones de séparation, etc.;
- obstacles sur certaines parties du courant où le lit du fleuve a une tendance constante à changer de forme, comme, par exemple, par suite d'écroulement des rives, de déplacements de bancs de sable, de l'ensablement des bras navigables et autres;
- inexistence de la profondeur minimale de 2 m exigée dans les courbures pour les voies navigables de la largeur de 180 m à 200 m;
- manque de la profondeur exigée de 2,50 m pour la seconde étape de l'aménagement de la voie navigable.

En ce qui concerne la répartition de tous les obstacles ci-dessus énumérés, on a obtenu les résultats suivants :

Pour la section I (frontière nord-confluent de la Drave), 33 % du tronçon de 50 km de long;

Pour la section II (confluent de la Drave-confluent de la Theiss) 27 % du tronçon de 168 km de long;

Pour la section III (confluent de la Theiss-confluent de la Save) 41 % du tronçon de 45 km de long;

Pour la section IV (confluent de la Save, 1 070 km) 17 % du tronçon de 100 km.

La section I et la partie en amont de la section II

se distinguent par le manque de sécurité de la navigation, en raison de courbures invisibles de petit rayon. Plus loin en aval, des obstacles apparaissent, particulièrement aux confluent des affluents principaux et à certaines distances en aval d'eux.

C'est ainsi qu'en aval de la Drave, se montrent des bancs de sable mouvant et, dans le rayon du confluent de la Theiss, de bancs de sable très instables, aussi bien par leur forme que par l'époque de leur apparition. Il en est de même en aval du confluent de la Save, tandis qu'en aval du confluent de la Morava, c'est seulement après d'importants travaux que l'état de la voie navigable a été corrigé. Cet état des bancs de sable dans le lit du fleuve est influencé non seulement par la quantité et la dimension des grains des alluvions que ces grands affluents déversent dans le Danube, mais aussi par l'action réciproque constante des remous et des dépressions sur le cours principal du fleuve et de ses affluents.

Dans le lit du Danube, l'apparition de seuils sur les inflexions n'est pas manifeste, de même que certains autres phénomènes qui donnent leur caractère aux rivières du type Fargue. On remarque cependant que la formation des bancs est presque obligatoire là où pour n'importe quelle raison, le lit du fleuve a été élargi au-dessus des largeurs normales stables pour l'étiage navigable (durée 93 %). Ces largeurs sont les suivantes par section : pour la 1^{ère}, 380 m; pour la 2^e, 420 m; pour la 3^e, 480 m. L'instabilité des bancs de sable est surtout manifeste au confluent de la Theiss. Dans cette partie, les profondeurs navigables du Danube baissent par moment jusqu'à 1,50 m, alors que le tracé de la voie navigable est sinueux et très peu favorable à la navigation au moment des basses eaux.

Pour le secteur entre le confluent de la Theiss et celui de la Save on a étudié (*) les rapports entre les forces influant sur la formation du lit. On a trouvé que dans ce secteur sur lequel le pourcentage des obstacles à la navigation est le plus important, les forces dominantes sont celles du frottement (J_f) et celle de l'inertie (J_v), alors que la force centrifuge (J_c) et celle de Coriolis (C) sont nettement inférieures; leur rapport est de $J_f : J_v : J_c : C = 1 : 1,2 : 0,4 : 0,25$.

L'analyse des rapports entre la longueur, la profondeur, le rayon de courbure et autres éléments géométriques devient un moyen puissant, non seulement pour établir l'état existant du cours d'eau et désigner la place des interventions utiles, mais encore pour choisir les éléments de régularisation et pour prévenir le comportement du fleuve après l'exécution des travaux de régularisation.

Afin de déterminer l'état de la voie navigable et d'obtenir les éléments de régularisation, on a effectué pour le cours du Danube de la frontière hongaro-yougoslave jusqu'aux Portes de Fer, l'analyse détaillée des rapports entre la largeur et la profondeur du lit dans sa partie navigable et on a obtenu les rapports correspondants pour les eaux les plus basses, pour l'étiage navigable, et pour les eaux remplissant le lit du Danube. On a obtenu ainsi un aperçu des points où la largeur et la profondeur sont insuffisantes pour les basses eaux, comme aussi pour l'étiage navigable et pour les eaux remplissant le lit.

(*) Transactions of Institute for Development of Water Resources. Jaroslav Černi, Belgrade, vol. 10, n° 26 (1963), pp. 69-80.

6/ Rapport entre les largeurs et les profondeurs du lit pour l'étiage navigable dans le secteur confluent de la Drave-Vukovar.

Beziehung zwischen Bettbreiten- und tiefen für das schiffbare Niederwasser im Raume des Zusammenflusses von Drau und Vukovar.

7/ Configuration du lit du Danube dans la section confluent de la Drave-Vukovar.

Gestaltung des Donaubetts im Gebiet des Zusammenflusses von Drau und Vukovar.

SEC- TEUR	POUR L'ÉTIAGE NAVIGABLE					
	Largeurs			Profondeurs		
	max.	50 %	min.	max.	50 %	min.
I	600	380	220	7,6	4,4	1,0
II	830	450	160	13,0	4,9	1,9
III	940	550	240	12,0	5,2	1,8
IV	1 450	740	330	13,7	6,3	2,3
POUR LES EAUX LES PLUS BASSES DE 1947						
I	560	320	180	6,5	3,0	—
II	790	380	190	11,5	3,9	0,6
III	880	500	210	12,0	4,0	1,0
IV	—	—	—	—	—	—
POUR LES EAUX REMPLISSANT LE LIT (10-15 %)						
I	780	430	300	13	9,4	7,1
II	800	490	240	18	10,1	5,0
III	1 270	760	450	18,5	9,6	6,6
IV	—	—	—	—	—	—

On ne prévoit pas d'importants travaux de régularisation pour la section IV; elle se trouve dans la zone du remous futur du barrage des Portes de Fer.

Finalement, afin de déterminer l'influence des courbes sur la configuration du lit du fleuve, on a recherché la relation entre le rayon de courbure et les paramètres de formes, de sorte que l'on a établi, pour les sections I et II, des diagrammes :

$$h_{\max}/h_{\min} = f(R),$$

et

$$X_{\max}/B = f(1\,000/R)$$

parmi lesquels le dernier a donné l'aperçu le plus clair. Les rayons de courbure sont établis d'après les contours de la rive concave. La longueur $X_{\max}$ représente la distance du bord de la rive concave jusqu'à l'endroit le plus profond, alors que B indique la largeur du lit à l'étiage navigable.

Les profils du lit régulier à l'étiage navigable sont groupés dans la zone 1. Les bas-fonds qui apparaissent sur les sections élargies et déformées du lit, avec des rayons de courbure relativement grands, se trouvent dans la zone 2. Les endroits présentant des obstacles, à cause de leur moindre rayon de courbure ou à cause de la largeur insuffisante du lit, sont groupés dans la zone 3.

Mouvement et arrêt des glaces

Aux frontières de la Yougoslavie, la glace apparaît régulièrement presque chaque année sur le Danube. La probabilité annuelle de l'apparition de la glace dans les différents secteurs varie entre 87,5 % dans le secteur Mohač-Drave, à 70,8 % près de Turnu-Severin, ce qui veut dire dans des limites relativement étroites.

La probabilité annuelle de la prise du fleuve dans ces secteurs varie entre 64,3 % et 3,6 %. En ce qui

concerne l'arrêt des glaces, on peut dire que les cataractes aval dans le secteur des Portes de Fer, qui se trouvent à une dizaine de kilomètres en amont de Turnu-Severin et où la glace ne prend jamais, divisent le Danube en deux parties distinctes. La probabilité de prise du fleuve, de 3,6 % à Turnu-Severin, est due à la propagation vers l'amont de la couche de glace formée sur le bas Danube, en aval de cet endroit.

Dans le secteur yougoslave du Danube, l'index de la prise du fleuve est le plus grand en amont du confluent de la Drave. Dans cette partie du fleuve, la glace s'arrête à cause de la faible pente, de la présence des îles et de fortes courbures. A partir du confluent de la Drave, l'index de la prise du fleuve diminue continuellement.

Dans le secteur Bazijaš-Turnu-Severin, l'index augmente de nouveau parce que, au commencement du défilé des Portes de Fer, en aval de Morava, la largeur du fleuve diminue de 1 000 m à 320 m et, dans les Kazans en aval d'un élargissement, est réduite brusquement de 950 à 150 m.

Les glaces avec le pont en béton précontraint (Portées de 250 et 180 mètres).

Eisversetzung bei der Brücke aus vorgespanntem Beton (lichte Weiten 250 und 180 Meter).

La couverture de glace qui se forme sur le Danube moyen peut, dans des conditions défavorables, s'étendre jusqu'à 1 000 km en amont des Portes de Fer. Mais même au cours des hivers très rigoureux, on observe des surfaces libres de glaces pouvant atteindre quelques dizaines de kilomètres.

GRANDS TRAVAUX ET GRANDS PROJETS

La position du lit du fleuve dans la partie yougoslave dans la plaine pannonienne est limitée du côté droit par de hautes terrasses de loess et des collines, alors que les plaines de la rive gauche sont exposées aux inondations; de ce côté, on retrouve

Trois vues de la Sava et du Danube (*Drei Ansichten der Sava und der Donau*) :

a) Avec le monument « Lictor », on voit à gauche deux bras du Danube qui versent leurs eaux à la Sava; au fond le nouveau Belgrade et tout à droite la banlieue Zemun.

a) Das Denkmal « Lictor », links zwei Arme der Donau, deren Wasser in die Sava fließen, im Hintergrund Neu-Belgrad und ganz rechts der Vorort Zemun.

b) Avec l'église et les restes d'une porte romaine, on voit une partie de l'Île-Grande entourée par la Sava, les bras du Danube (à gauche) et le Danube, dont on voit une très petite partie tout à droite.

des traces des anciens cours du Danube. Vu les grandes masses d'eau qui s'écoulent, on peut sûrement conclure que le déplacement continu du Danube vers la droite, entre autres facteurs, est dû en grande partie à la force de Coriolis.

Cette position du fleuve fait que la tendance à décrire des méandres n'apparaît que sur quelques secteurs du fleuve, de courte longueur, là où le fleuve, dans son déplacement vers la droite, n'a pas encore atteint le pied des collines et hautes terrasses. Le plus large de ces secteurs, d'environ 50 km, se trouve entre la frontière hongroise et le confluent de la Drave, mais on en rencontre aussi par endroits plus en aval. Sur ces secteurs, des travaux de correction du lit ont été faits dans les dernières décennies par la fermeture des bras secondaires, la construction de digues longitudinales, par des défenses de rives et la rectification du lit par voie de coupures.

C'étaient d'importants travaux ayant pour but des améliorations locales de la navigation et la protection des rives contre les éboulements. Sur une longueur de 400 km, de la frontière hongroise jusqu'à l'entrée du défilé des Portes de Fer, au cours des soixante-dix dernières années, les travaux exécutés sont les suivants : consolidation de la rive gauche sur une longueur de 50 km; de la rive droite sur 33 km; barrage de bras secondaires sur 13 km; construction de digues longitudinales, des deux côtés du lit sur 3 km et, sur un seul côté, sur 6 km; coupure des courbes sur 14 km; ouverture de la voie navigable dans le lit rocheux sur 6 km [8].

Il est intéressant de noter, que malgré la ten-

dance générale du fleuve à attaquer la rive droite, de plus grandes défenses de rives furent exécutées sur la rive gauche du fleuve. Cela vient de ce que la longueur des digues de défense des terrains bas sur la rive droite est bien moindre que sur la rive gauche où, pour gagner une plus grande surface de terrains protégés, les digues sont très rapprochées des rives peu résistantes du fleuve.

Les travaux de correction du cours d'eau et de défense des rives dans ce secteur ont contribué à l'amélioration des conditions de navigation et combattu les tendances locales d'élargissement du lit ou de bifurcation du cours d'eau. Pourtant, il reste encore beaucoup à faire pour une régularisation définitive du secteur entier, notamment aux confluent de la Theiss et de la Save. Les travaux à faire se réduiront à d'autres fermetures de bras secondaires, à des rétrécissements locaux du lit du fleuve et à un très petit nombre de coupures de courbes. Ces travaux futurs, tout comme les travaux déjà faits, ne peuvent pas être rangés dans les grands travaux. Les plus urgents et les plus importants parmi eux sont la régularisation du secteur entre la frontière hongroise et le confluent de la Drave, du secteur du confluent de la Theiss, dans l'intérêt de la navigation, et les travaux de régularisation du confluent de la Save à Belgrade où les exigences urbanistiques priment.

Une importance particulière s'attache aux travaux de régularisation du cours d'eau pour la navigation du secteur des Portes de Fer. Ces travaux sont décrits dans un autre chapitre de ce rapport. Ils n'ont pas entièrement satisfait les exigences de

b) Die Kirche und die Ueberreste eines römischen Tors; die Aufnahme zeigt einen Teil der Grossen Insel, die von der Sau, den Nebenarmen der Donau (links) und der Donau, von der man ganz rechts einen sehr kleinen Teil sieht, umgeben ist.

c) Le confluent de la Sava avec le cours principal du Danube; entre eux une partie de l'Ile-Grande.

c) Der Zusammenfluss der Sau mit dem Hauptlauf der Donau, zwischen den beiden ein Teil der Grossen Insel.

Ecluse à Bezdan :
une des premières écluses construite en béton, année 1860.

Schleuse bei Bezdan :
eine der ersten in Beton ausgeführten Schleusen. Baujahr 1860.

aux basses eaux, alors qu'auparavant elle n'était possible qu'aux hautes eaux, dont la durée ne dépassait pas deux mois.

Les très grandes masses d'eau que le Danube et ses affluents, en hautes eaux déversent dans la partie la plus basse de la plaine pannonienne causaient de grands dommages et empêchaient l'exploitation des terres agricoles. C'est pourquoi des travaux d'amélioration, à une échelle modeste furent commencés déjà à l'époque romaine : le tracé d'un canal d'évacuation de ce temps est encore conservé. Cependant, un travail organisé de défense contre les inondations n'a commencé qu'au XVIII^e siècle et se poursuit jusqu'à nos jours.

La région que le Danube et ses affluents inondent dans la plaine pannonienne représentait autrefois une suite infinie de marais avec des eaux stagnantes et une végétation caractéristique; ce n'est que dans les lieux plus élevés que purent se développer les habitations d'agriculture et l'élevage du bétail sous une forme primitive. Au cours du temps, 600 000 ha de terres furent protégés contre les inondations et l'assèchement d'une surface de 1 200 000 ha fut assuré. Le développement économique de cette région a été constamment sous le signe des grands investissements matériels et de la lutte contre les inondations.

Dans cette région, appelée Voïvodina (Le Duché), on a élevé le long des rives du Danube et de ses affluents 1 300 km de digues de défense, dans lesquelles on a mis environ 100 millions de m³ de terre. Pour drainer les territoires protégés, on a construit plus de 12 000 km de canaux de grandeurs

la grande navigation, mais, avec des travaux complémentaires ultérieurs, ils ont rendu possible d'établir, dans les six décennies passées, une navigation

différentes, avec 135 stations de pompage, dont la capacité totale est d'environ 200 m³/s. Le nombre des stations de pompage indique que le grand défaut du système de drainage est sa dispersion.

En dehors de cela, on a construit au XIX^e siècle trois canaux de navigation d'une longueur de 178 km. L'un d'eux relie le Danube à la Theiss entre Bezdan et Betchei et l'autre relie ce canal avec le Danube à Novi Sad, ville principale de la province de Voïvodina, tandis que le troisième était construit en partie parallèlement à la rivière Beguéi et en partie par canalisation du Beguéi entre la Theiss et la frontière roumano-yougoslave.

Les trois canaux sont munis d'écluses de navigation sur leur tracé et aux jonctions avec le Danube et la Theiss.

Par des améliorations continuelles des digues de défense et surtout après les inondations catastrophiques de l'année 1926, on est arrivé à des types et dimensions de digues qui ont depuis lors résisté aux crues de longue durée.

Il s'est avéré cependant que le réseau des canaux d'évacuation des eaux intérieures ne satisfait ni par sa structure ni par les dimensions des émissaires. Ce réseau a été calculé pour des modules de 0,1 à 0,2 l/s/ha et il faudrait des modules de 0,3 à 0,7. L'abaissement de la nappe aquifère des eaux aux niveaux plus bas et leur évacuation n'étaient pas prévus. Pour cette raison, maintes surfaces drainées furent soumises à la salinisation et souffrirent de la sécheresse dans un climat d'ailleurs semi-aride. Les sécheresses devenaient plus éprouvantes pour une population croissante.

Les irrigations n'étaient pas davantage l'objet de projets antérieurs et les réalisations furent sans système et localisées.

Le canal Danube-Theiss-Danube

Le caractère incomplet du système de drainage des eaux intérieures et souterraines s'est manifesté surtout en 1942 lorsque toute la partie orientale de la province de Voïvodina, le Banat, située entre la frontière roumaine et la Theiss, eut à souffrir des inondations, et la partie occidentale, la Batchka, entre la Theiss et le Danube, un peu moins. C'était pendant la deuxième guerre mondiale, mais la Voïvodina se trouva dans une situation pareille en 1956 également.

D'après les statistiques, il y a eu à Voïvodina, dans les 100 dernières années, 32 années avec inondations, 51 sèches et seulement 17 favorables à la récolte. La température moyenne annuelle est de 11,2 °C et, pendant la période de végétation, 18 °C. La température maximale est de + 44 °C et minimale de - 31 °C. Les précipitations varient de 450 à 836 mm par an, alors que, dans la période critique mai-août, elles sont de 255 mm en moyenne. Le degré d'aridité peut être exprimé par le fait que dans 28 années sur 100, au cours des 4 mois de la période critique, il tombe moins de 200 mm de pluie, bien qu'elle comprenne le mois de juin qui est toujours très pluvieux.

De l'examen de la production agricole pour deux années consécutives, il ressort clairement comment les conditions climatiques influent sur elle. Ainsi, en 1953 où les précipitations étaient de 334 mm supérieures à celles de 1952, l'excédent de la production agricole s'est élevé à 249 000 wagons.

La sécheresse et les inondations sont les deux

facteurs principaux qui influencent la stabilité de la production agricole dans la plus importante région agricole yougoslave, la Voïvodina. Ces facteurs diminuent l'effet des mesures prises pour l'avancement et l'augmentation de cette production. Ils ont également de l'effet sur la stabilité de l'industrie des produits agricoles, qui dispose, d'ailleurs d'excellentes conditions pour son développement.

Tout retard apporté à la solution complexe des questions du régime des eaux causerait dans cette région des dommages incalculables. C'est pourquoi, et dans un but d'utilisation optimale des terres agricoles, et de leur protection contre la dégradation, on a dû recourir à un remaniement complet, et au parachèvement du système existant d'améliorations, c'est-à-dire à une solution intégrale de la question du régime des eaux dans toute la région de la Voïvodina. Ce n'est que de cette manière qu'on peut créer des conditions favorables au développement futur et à la modernisation de l'agriculture, ainsi qu'à la progression de l'industrie dans cette région, la plus peuplée de la Yougoslavie.

Une telle solution est apportée par le nouveau système hydrotechnique Danube-Theiss-Danube, qui se trouve en pleine réalisation.

LE PROJET. — L'idée de construire le canal Danube-Theiss-Danube qui, à cause du grand réseau des canaux, porte aujourd'hui en Yougoslavie le nom de système hydrotechnique Danube-Theiss-Danube, est due à l'éminent ingénieur yougoslave et connaisseur du régime des canaux de la Voïvodina, Nikola Mirkov. D'après sa proposition, le grand canal Danube-Theiss-Danube (Bezdan-Bečej-Banat-Palanka) doit être navigable sur toute la longueur et être la colonne vertébrale du développement industriel de la Province et de son économie.

L'établissement du projet a été précédé d'études poussées et d'investigations, commencées en 1947. Les levés topographiques et l'établissement des cartes ont porté sur environ 1 050 000 ha; les sondages géologiques comportaient le forage de 2 350 trous de sonde. De même, l'étude pédologique, avec la confection de cartes et la classification préalable des terrains envisagés pour l'irrigation et le drainage était faite. On a organisé des observations systématiques de l'état des eaux souterraines dans plus de 1 000 puits. Sur la base de ces travaux de recherches et d'études, on a élaboré un avant-projet, approuvé en 1957, pour tout le système.

Le système D.T.D. résout les problèmes de drainage, d'irrigation, de navigation et d'alimentation en eau des industries sur le territoire de la Bačka méridionale et du Banat. Il est composé du réseau principal de canaux comme récipient principal d'évacuation des eaux et d'irrigation. A ce réseau de base, sont rattachés les systèmes locaux d'irrigation et de drainage. Les canaux principaux sont tracés en suivant le terrain le plus bas et le niveau de l'eau dans les canaux est en règle générale de 1 à 2 m en contre-bas du terrain, c'est-à-dire au niveau des eaux souterraines et même plus bas.

Les surfaces dont les canaux de drainage reçoivent l'eau sont : dans la Bačka (partie occidentale du système), environ 528 000 ha; dans le Banat (partie orientale), environ 548 000 ha. De plus, vers le système, gravitent les eaux de 440 000 ha en Hongrie et en Roumanie.

Dans le même réseau de canaux, on introduit,

Un des canaux principaux
du système hydraulique Danube-Tisa-Danube, en Bačka
(partie occidentale de la province Vojvodina).

*Einer der Hauptkanäle des Systems Donau-Theiss-Donau in der Bačka,
dem westlichen Teil der Provinz Vojvodina.*

du Danube et de la Theiss, les quantités d'eau nécessaires à l'irrigation de 210 000 ha de terres agricoles dans la Bačka et de 150 000 ha dans le Banat. Les quantités d'eau sont introduites dans le système par gravité et partiellement par pompage.

Sur les canaux principaux, une navigation pourra se développer sur une longueur de 508 km sur les nouveaux canaux et de 177 km sur les anciens.

QUELQUES RENSEIGNEMENTS SUR LA CONCEPTION TECHNIQUE [9]. — Le canal principal part de Bezdan sur le Danube, suit en majeure partie les cours d'eau naturels et les dépressions et aboutit dans la Theiss près de Bečej. Dans cette partie, il est long de 129,8 km. Dans la partie orientale de la Voïvodina, il part de Bečej sur la Theiss, coupe les rivières Begej et Tamiš, poursuit sur le tracé d'anciens canaux, traverse la ligne de partage des eaux à Potporanj et, à Banatska Palanka, rejoint le Danube. Dans cette partie, il est long de 143 km. La longueur des embranchements du canal principal dans la Bačka est 190,4 km, celle des anciens canaux 100,2 km, de sorte que la longueur de tous les canaux dans la Bačka est de 420,4 km. Dans le Banat, la longueur des embranchements du canal principal est 109,2 km celui de la rivière canalisée Begej 77,2 km, de sorte que la longueur totale de tous les grands canaux au Banat est 329,8 km.

La largeur du plan d'eau dans ces canaux varie de 18 à 150 m, et la profondeur de 2 à 5,5 m. La profondeur des déblais varie selon la configuration du terrain entre 3 et 21 m. Le volume prévu des terrassements s'élève à 128 millions de m³. La capacité cumulée des canaux d'évacuation aux points de jonction avec la Theiss et le Danube dans la Bačka est de 157 m³/s et, à leurs débouchés dans le Tamiš et le Danube au Banat, de 800 m³/s.

Pour l'irrigation, on prend au Danube, à Bezdan et à Bogojewo, par gravité ou pompage 111 m³/s et à la Theiss par gravité ou pompage, 60 m³/s pour les irrigations dans le Banat.

Cette capacité des canaux est déterminée en prenant dans la Bačka, pour 212 645 ha dont on évacue les eaux intérieures, un module moyen de drainage de 0,4 l/s/ha et pour 474 160 ha, un module moyen de 0,15 l/s/ha. Dans le Banat, les modules moyens de drainage varient de 0,26 l/s/ha au nord, à 0,52 au sud du Banat.

Les canaux principaux sont posés à une profondeur telle qu'ils servent en même temps au drainage et à l'irrigation. Après des études poussées, on a renoncé au système double avec canaux d'évacuation placés bas et canaux d'irrigation placés haut, parce qu'un tel système demanderait un plus grand nombre de stations de pompage et une augmentation des frais de construction.

Des 360 000 ha pour l'irrigation, il a été prévu 270 000 ha pour l'irrigation de surface et 90 000 pour arrosage par aspersion (pluie artificielle). Cependant, il a été constaté sur les champs d'essais, d'environ 15 000 ha, que les cultivateurs n'étaient pas favorables à l'irrigation de surface et l'adoptaient rarement. Dans l'établissement des systèmes partiels il faudra tenir compte de ce fait et il est probable que la proportion de l'application des différents systèmes d'arrosage s'en trouvera inversée.

Ouvrages sur les canaux principaux

Sur le réseau principal de canaux, on fera toute une série de constructions qui formeront avec lui un ensemble fonctionnel unique; un grand nombre de ces constructions est déjà terminé ou en cours de construction. Le nombre et le genre des installations principales sont indiqués dans l'aperçu qui suit :

- 17 barrages à vannes pour le réglage du niveau et de l'écoulement des eaux, pour les besoins du drainage et de l'irrigation, dont le plus important, à Bezdan, a un débit de 60 m³/s;
- 13 écluses de navigation;
- 3 pompes, de 18,20 et 30 m³/s pour l'alimentation supplémentaire en eau en cas de baisse du niveau d'eau ou pour l'évacuation de l'eau du canal en cas de hausse du niveau de l'eau du Danube et de la Theiss;
- 89 ponts en béton et acier, de 30 à 180 m de long;
- 106 bâtiments pour les services techniques, de la surveillance, de garde, etc. Environ 80 km de routes d'accès, lignes téléphoniques, lignes de haute tension, etc.;
- un barrage sur la Theiss pour capter l'eau par gravité, pour les besoins de l'irrigation du Banat.

Le devis estimatif pour toutes ces constructions, excepté le barrage sur la Theiss, se monte à 31 042 millions de dinars :

	MILLIONS DE DINARS
— pour l'expropriation.	948
— pour les travaux d'investigations, les études, les projets, etc.	3 975
— pour les terrassements d'environ 128 millions de m ³ de terre.	26 119
<i>Total.</i>	<i>31 042</i>

La mécanisation du travail :
Machines terrestres et flottantes.

*Zwei Ansichten der Mechanisierung der Bauarbeiten :
Bodengeräte und Schwimmgeräte.*

Mécanisation et main-d'œuvre

Le déblai et le transport de la terre s'effectuent exclusivement par des moyens mécaniques. Le choix des machines a été fait d'après les données topographiques et hydrauliques. Sur le chantier, d'une longueur de 573 km, il y a 300 machines pour les gros travaux, dont une moitié pour le creusement et l'autre pour le transport de la terre.

Une partie des machines terrestres et flottantes est fabriquée par les entreprises du pays. La capacité des machines se monte à environ 5 500 m³/h.

A peu près 75 % de travaux d'études et de construction sont faits en régie par la direction D.T.D. et 25 % par d'autres organisations engagées par la Direction D.T.D. Les travaux en régie sont conduits par environ 80 ingénieurs, assistés de 160 géomètres et agents techniques et 40 assistants de laboratoire.

Quelques problèmes d'une importance particulière

La construction des éléments du système mentionnés ne présente aucune difficulté particulière. Toutes les constructions, ainsi que le réseau de canaux tout entier, qui, par endroits, reçoit ou coupe les cours d'eau existants, sont préalablement étudiés en détail par des instituts techniques et des laboratoires.

Une attention particulière doit être portée à l'étude hydrologique des drainages de la partie orientale du système, où les canaux principaux se croisent avec d'importants cours d'eau tels que le Tamiš, le Begej et autres, et ensuite aux études géomécaniques sur les tracés de tous les canaux principaux, à l'étude des types d'écluses sur l'analogon électrique à trois dimensions, comme à l'étude des écluses sur des modèles hydrauliques.

Mais deux ouvrages sont néanmoins des plus importants : la percée d'une ligne de partage des eaux dans la partie sud-orientale extrême du système et le barrage sur la Theiss. Le premier offre l'occasion d'acquérir une précieuse expérience dans la percée de canaux profondément enclavés; en ce qui concerne l'autre grand ouvrage, il n'a pas encore été pris de décisions définitives, une solution se présentant comme grande concurrente.

Percée de la selle de Potporagne

Traversant la dépression de Banat, l'hydrosystème D.T.D., ayant pour but essentiel de drainer ces bas terrains, a dû être situé le plus bas possible. Pour évacuer les eaux collectées par le canal principal, on se heurte à un important obstacle, la selle de Potporagne, qui dépasse d'une vingtaine de mètres le fond du canal collecteur projeté. Dans le secteur du Potporagne, la couche superficielle consiste en argiles imperméables, dont la surface de contact avec le sable sous-jacent monte jusqu'à 10 mètres du fond projeté. L'eau souterraine dans les sables est en charge, dépassant à l'état naturel initial la surface du terrain. En aval, où les couches superficielles sont de plus en plus faibles, le fond du canal pénètre dans la couche perméable de base.

Le problème le plus difficile dans la réalisation du canal a été dû aux eaux sous pression provoquant de forts gradients hydrauliques dépassant les valeurs 2,0 (calculées pour l'état initial de charge) comme aussi le niveau d'eau dans le canal après la construction du barrage-écluse aval de Kajtasovo. Pendant la construction du canal, les gradients, calculés par rapport à la charge initiale de l'eau artésienne, devraient être encore plus grands. Dans toute la zone où les gradients dépassent la valeur de 1,0, on pouvait s'attendre à l'apparition de renards et même à des ruptures du fond. Toutefois, il n'était pas opportun de construire les puits de dépression

avant la construction du canal, à cause de plusieurs raisons, dont nous citons deux :

1° Etant donné que la construction du canal devait commencer de l'aval vers l'amont, le drainage provoqué par la partie déjà construite du canal devait sensiblement diminuer les charges;

2° Il a été logique de vérifier sur le terrain si, et à quel degré, on peut dépasser les gradients critiques $I = 1,0$.

La partie aval déjà construite a eu effectivement un effet favorable en abaissant la charge de plus de 30 m. La construction se poursuivait plus en amont. Dans le fond du canal apparaissaient les renards quand les gradients de charge dépassaient la valeur de 2,1. On peut trouver une description détaillée de tous les phénomènes qui caractérisaient les travaux dans le secteur délicat, — km 23, km 30, — dans un article du professeur Šuklje [10].

En utilisant les données de piézomètres et des essais de pompage, et en analysant les phénomènes repérés dans la nature, différents projets de réalisation de la dernière étape du canal D.T.D. dans le secteur de Potporaň ont été proposés. Leurs caractéristiques essentielles sont : provoquer un remous par une digue, réaliser le canal sur toute la largeur sans toucher la partie inférieure du profil le long du secteur critique, que l'on excaverait après la mise en fonctionnement des puits de dépression spontanés.

Le barrage sur la Theiss

Les deux parties de la Voïvodina, de la Bačka et le Banat, sont séparées par la rivière navigable la Theiss, qui partage en deux également tout le système d'améliorations agricoles. Il est indispensable pourtant de réunir ces deux parties, ce à quoi on arrivera par la construction d'un barrage sur la Theiss. Le barrage assurerait l'irrigation par gravité du Banat tout en reliant de la meilleure façon les réseaux navigables des deux régions, sans empêcher le drainage par gravité de la partie ouest du système. L'irrigation du Banat pourrait être réalisée aussi par pompage de l'eau de la Theiss, mais on se heurte ici à des difficultés, puisque par le prélèvement par les pompes de 60 m³/s on risque de perturber le régime du cours d'eau sur une longueur de 64 km jusqu'au confluent du Danube.

Le programme prévoit la solution avec pompage, bien qu'elle présente l'inconvénient mentionné, et qu'elle coupe le réseau navigable et le système d'irrigation par gravité. Une décision n'est pas encore prise, des corrections étant apportées au projet primitif du barrage, qui améliorent dans une large mesure les perspectives de sa construction (réalisation). Le projet du barrage, qui n'a pas soutenu la concurrence des pompes, prévoyait le rehaussement du niveau de la Theiss à la cote moyenne de 77,5 m, avec construction d'une écluse de navigation et d'une usine hydroélectrique. Par l'élimination de cette dernière et l'abaissement du niveau

Maquette du barrage sur la Theiss
près de Becèi (variante I).

*Modell der Staumauer in der Theiss in der Nahe
von Becèi (Alternative I).*

8/ Coupe transversale du barrage.

Querschnitt durch die Staumauer.

relevé de la Theiss à la cote moyenne de 75,0 m on arrive à une solution qui satisfait l'unité du réseau navigable et celle du système d'irrigation par gravité du Banat, sans changer le régime de la Theiss en amont du barrage dans la Hongrie voisine.

De cette manière, tout le système Danube-Theiss-Danube prend le caractère particulier d'un système où l'eau est toujours en mouvement, ce qui est d'une importance capitale pour les agglomérations et les industries qui vont s'établir le long de ses canaux.

Après de laborieuses études, parmi lesquelles les études géologiques furent les plus importantes, le meilleur emplacement a été choisi pour le barrage, au km 62+988 du confluent de la Theiss avec le Danube. Le sous-sol, à l'endroit prévu pour le barrage, est composé d'argiles et de sables et d'argiles marneuses et sableuses de la période quaternaire. Pour la profondeur et la largeur de fondation prévues, la capacité de portée du sol est de 3 kg/cm², l'angle de frottement intérieur, 24-30°, la cohésion 0,37 kg/cm.

L'infiltration sous le barrage peut être empêchée par un rideau de palplanches métalliques Larsen, longues de 11 m, qui traverserait toutes les couches sableuses pour pénétrer à une profondeur suffisante dans la couche massive d'argile de base.

Le volume utile de l'accumulation est de 32 millions de m³. La concentration moyenne du débit solide 0,315 kg/m³.

Le barrage en projet comporte sept ouvertures de 25 m de largeur, avec seuil en béton à la cote 68,0 m qui s'encadre bien dans le profil en long que forment les point d'inflexion du cours d'eau. Des vannes-segment de 5,5 m de hauteur sont surmontées de clapets hauts de 2 m. Une crue d'un débit $Q = 3\,850\text{ m}^3/\text{s}$ produirait un remous de 5 cm.

Une écluse de navigation est prévue à côté du barrage, avec une longueur utile de 120 m partagée en deux par une porte intermédiaire, afin de diminuer la consommation d'eau lors de passages de bateaux plus petits à l'époque des débits de pointe d'irrigation. Pour une chute maximale de 7 m,

l'écluse est capable d'évacuer 32 bateaux en 24 heures.

La construction du barrage avec écluse sur la Theiss n'augmenterait les frais de construction de tout le système DTD que de 6 % par rapport à la solution avec pompes étudiées également dans le projet, mais elle offre pour l'exploitation des conditions bien meilleures.

Bibliographie

- [1] P. VUJEVIC. — Les caractères hydrologiques de fleuves et rivières en Serbie (en serbo-croate). *Institut za vodoprivredu*, 1951.
- [2] D. CERNISEVSKI. — Détermination du remous dans le Danube après l'endiguement du Pančevački Pit. *Vodoprivreda*, n° 4, 1953.
- [3] G. BATA. — Régularisation du Danube dans le secteur de Slankamen. *Comptes rendus de l'Institut za vodoprivredu*, n° 2, 1955.
- [4] D. CERNISEVSKI. — Le niveau maximum probable dans le secteur Bezdan-Dubovac. *Vodoprivreda*, 3-4, 1961.
- [5] G. BATA. — L'hydrologie du Danube près de Belgrade. *Institut za vodoprivredu*, 1963.
- [6] S. BRUK et G. BATA. — Les problèmes de la régularisation du Danube dans le secteur de Novi Sad.
- [7] G. BATA et N. ASKOVIC. — L'accroissement des crues de la Save, comme conséquence des endiguements. *Institut za vodoprivredu*.
- [8] R. DRAGOVIC. — Plovidba u Djerdapu (La navig. dans le sect. des Portes de Fer.) 1960, Belgrade; en serbo-croate, 205 pages, illustrations.
- [9] D. MILOVANOV, Z. SUPUT. — Hidrosistem Dunav-Tisa-Dunav. 1960, Novi Sad; en serbo-croate, 52 pages folio illustrées.
- [10] L. SUKLJE. — Facteurs gouvernant les gradients critiques dans la base d'excavation Ass. IX, *AIRH, Dobrovnik*, 1961.

Zusammenfassung

Die Donau in Jugoslawien

Von B. Knezevic *

Ihre grossen Zuflüsse — Drau, Theiss und Sau — die ihre Wasserführung verdoppeln, nimmt die Donau im jugoslawischen Abschnitt auf. In einem grossen Teil des jugoslawischen Abschnitts führen diese Nebenflüsse zu Störungen des Wasserspiegels, so dass es oberhalb ihrer Vereinigung mit der Donau auf einer über 100 km langen Strecke zu Rückstauungen und Spiegelsenkungen kommt. Die Hochwasser der Donau entstehen durch die gleichzeitige hohe Wasserführung der Donau und ihrer Nebenflüsse (z.B. das Katastrophenhochwasser von 1940). Trotz der umfangreichen Geschiebefracht ihrer Nebenflüsse verändern sich das Gefälle der Donau, ihre Breite und Tiefe stromabwärts mit zunehmender Wasserführung durch die Zufuhr dieser Nebenflüsse doch ziemlich regelmässig. Durch die mitgeführten Feststoffe kommt es weiter dann nur zu örtlichen Störungen des Stromes, nämlich in Höhe der Zusammenflüsse, was darauf zurückzuführen ist, dass die Eigenschaften des Materials dieser Nebenflüsse in der Grössenordnung denen der Donau gleich sind. Es ist vor allem ein ziemlich kleiner Fluss — die Morava (Stromkilometer 1103, $Q_{\text{mittl.}} 260 \text{ m}^3/\text{s}$) — die einen bedeutenden Bruch im Gefälle der Donau hervorruft. Der von ihr zugeführte Kies führt zu einer Pflasterung im Bett der Donau. An dieser Stelle beträgt das Transportvermögen der Donau ein Zehnfaches gegenüber dem oberhalb des Zusammenflusses (bei gleichem Material). Bei Stromkilometer 1048 tritt die Donau in das majestätische Durchbruchstal des Eisernen Tors (ein besonderer Artikel ist diesem Abschnitt gewidmet).

Das hydrologische Regime der Donau unterliegt ständigen Schwankungen; die Hochwasserführung nimmt an Umfang zu, was auf vielen Ursachen beruht, deren wichtigste wohl die Eindämmung der tiefer liegenden Gebiete sein dürfte, die ausgeführt wird, um diese Gebiete gegen Ueberschwemmungen zu schützen. Durch die Eindämmung des Pančevačkirits wurde ein Rückstau von 700 Millionen Kubikmeter beseitigt. Der Ausbau der Logna-Niederung an der Sau, die heute von zwei Milliarden Kubikmeter Wasser überschwemmt ist, wird bei Hochwasser in Höhe des Zusammenflusses von Sau und Donau eine Zunahme von über $800 \text{ m}^3/\text{s}$ der Wasserführung mit sich bringen.

Im allgemeinen ist die Donau nur in geringem Masse ein Strom, der den Fargueschen Gesetzen folgt: selbst der Krümmungsradius hat nur einen ziemlich geringen Einfluss. Dies ist dadurch bedingt, dass die Zentrifugalkräfte relativ schwach und grössenmässig den Corioliskräften gleich sind. Durch diese Corioliskräfte lehnt sich der Fluss im grössten Teil der jugoslawischen Strecke mit seinem rechten Ufer an die verhältnismässig stabilen Gelände an, die aus Löss- oder Felsterrassen gebildet sind. Gesagt werden muss hier jedoch, dass auch die Zentrifugalkräfte eine gewisse Rolle spielen, wenigstens da, wo das Flussbett eine normale Breite aufweist, was sich durch das Vorhandensein einer gewissen Korrelation zwischen den Eigenschaften des Betts und dem Krümmungsradius äussert.

Im zweiten Teil des Artikels werden Angaben über das System Donau-Theiss-Donau (abgekürzt DTD) gemacht, das z.Z. zügig durchgeführt wird und bis in Kürze fertiggestellt sein dürfte. Von Ueberschwemmungen durch die Wasser der Donau und ihrer Nebenflüsse bedroht sind 600 000 ha der Niederung von Vojvodina, durch die die Donau in Jugoslawien fliesst und die den tiefliegendsten Teil des Pannonischen Beckens bildet. Die gezielte Verteidigungsarbeit gegen Ueberschwemmungen reicht zurück bis ins 18. Jahrhundert. Gebaut wurden seither 1300 Kilometer Deiche, die 100 Millionen Kubikmeter Boden umfassen, 12 000 Kilometer Kanäle, 135 Pumpstationen mit einer Leistung von $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Verteidigungssystem wies jedoch zwei Nachteile auf: es war zu hoch angelegt, um eine Entwässerung der Grundwasser während der feuchten Perioden zu erzielen; ausserdem liess es auch eine Bewässerung der Gebiete während der trockenen Perioden nicht zu. Durch das neue DTD-System werden diese Probleme gelöst. Der Hauptkanal des DTD-Systems umfasst zwei Abschnitte: der erste verbindet die Donau mit der Theiss, der zweite — viel weiter stromabwärts — die Theiss mit der Donau. Die Länge dieser Abschnitte beträgt 130 und 143 km. Ausserdem umfasst das System 17 grosse Schützen und 13 Schiffahrtssehlusen. Dem Bau des Hauptkanals stellten sich zahlreiche Schwierigkeiten entgegen, vor allem im stromabwärtigen Teil (Sattel von Potporagne), wo der Kanal über 20 m tief in das stark artesischen Drücken ausgesetzte Gelände eingegraben ist. Das System wird durch den Bau einer Talsperre an der Theiss oder durch ein ähnliches Bauwerk fertiggestellt.

* Früher Professor an der Fakultät für Bauingenieurwesen Belgrad (Ungarn).