

# RECUEIL D'INFORMATION

«MÉTHODES DE FORMULATION DES PRÉVISIONS HYDROLOGIQUES  
A LONGUE ET A COURTE ÉCHÉANCE  
POUR LES BESOINS DE LA NAVIGATION SUR LE DANUBE»

COMMISSION DU DANUBE  
Budapest, 1991

# **RECUEIL D'INFORMATION**

**«MÉTHODES DE FORMULATION DES PRÉVISIONS HYDROLOGIQUES  
A LONGUE ET A COURTE ÉCHEANCE  
POUR LES BESOINS DE LA NAVIGATION SUR LE DANUBE»**

**COMMISSION DU DANUBE  
Budapest, 1991**

Recueil d'information

"Méthodes de formulation des prévisions hydrologiques  
à longue et à courte échéance pour les besoins de la  
navigation sur le Danube"

## 1. Annotation

L'importance des prévisions hydrologiques et de leur utilisation pour les besoins de la navigation sur le Danube est bien connue. Toutefois, il convient de souligner l'importance des prévisions à courte et à longue échéance des niveaux d'eau, des débits d'eau et des phénomènes de glaces, compte tenu de leur influence sur les possibilités d'une utilisation plus efficace de la flotte danubienne dans les transports de marchandises, en particulier dans les transports réalisés sur de grandes distances.

En vue de l'amélioration des conditions de la navigation sur le Danube, la Commission du Danube a décidé d'élaborer, sur la base des documents reçus des pays danubiens, un "Recueil d'information" dans le but de promouvoir l'échange d'expérience et, par cela même, de contribuer à l'utilisation de méthodes plus fiables dans la formulation des prévisions hydrologiques pour les besoins de la navigation sur le Danube.

| <u>2. Table des matières</u>   | Page |
|--|------|
| 1. Annotation .....  | 1    |
| 2. Table des matières .....  | 3    |
| 3. Introduction .....  | 7    |
| 4. Méthodes de formulation des prévisions hydrologiques pour le Danube utilisées dans les pays danubiens ..... | 8    |
| 4.1 Prévisions du niveau d'eau   | 8    |
| 4.1.1 <u>Méthodes de formulation des prévisions à longue échéance des niveaux d'eau du Danube</u>              | 8    |
| 4.1.1.1 en République Fédérale d'Allemagne..   | 9    |
| 4.1.1.2 en République d'Autriche .....   | 9    |
| 4.1.1.3 en République Fédérative Tchèque et Slovaque .....   | 9    |
| 4.1.1.4 en République de Hongrie .....   | 24   |
| 4.1.1.5 en République Socialiste Fédérative de Yougoslavie .....   | 24   |
| 4.1.1.6 en République de Bulgarie .....  | 24   |
| 4.1.1.7 en Roumanie .....  | 34   |
| 4.1.1.8 en Union des Républiques Socialistes Soviétiques .....   | 34   |
| 4.1.2 <u>Méthodes de formulation des prévisions à courte échéance des niveaux d'eau du Danube</u>              | 46   |
| 4.1.2.1 en République Fédérale d'Allemagne..   | 46   |
| 4.1.2.2 en République d'Autriche .....   | 47   |
| 4.1.2.3 en République Fédérative Tchèque et Slovaque .....   | 49   |
| 4.1.2.4 en République de Hongrie .....   | 49   |

|  | Page |
|--|------|
| 4.1.2.5 en République Socialiste Fédérative<br>de Yougoslavie .....                                      | 50   |
| 4.1.2.6 en République de Bulgarie .....  | 69   |
| 4.1.2.7 en Roumanie .....  | 72   |
| 4.1.2.8 en Union des Républiques Socialistes<br>Soviétiques .....  | 72   |
| <u>4.2 Prévisions du débit d'eau</u>   | 73   |
| <u>4.2.1 Méthodes de formulation des prévisions<br/>à longue échéance des débits d'eau du<br/>Danube</u> | 73   |
| 4.2.1.1 en République Fédérale d'Allemagne..   | 73   |
| 4.2.1.2 en République d'Autriche .....   | 73   |
| 4.2.1.3 en République Fédérative Tchèque et<br>Slovaque .....  | 73   |
| 4.2.1.4 en République de Hongrie .....   | 73   |
| 4.2.1.5 en République Socialiste Fédérative<br>de Yougoslavie .....                                      | 78   |
| 4.2.1.6 en République de Bulgarie .....  | 78   |
| 4.2.1.7 en Roumanie .....  | 78   |
| 4.2.1.8 en Union des Républiques Socialistes<br>Soviétiques .....  | 96   |
| <u>4.2.2 Méthodes de formulation des prévisions<br/>à courte échéance des débits d'eau du<br/>Danube</u> | 96   |
| 4.2.2.1 en République Fédérale d'Allemagne..   | 96   |
| 4.2.2.2 en République d'Autriche .....   | 96   |
| 4.2.2.3 en République Fédérative Tchèque et<br>Slovaque .....  | 97   |
| 4.2.2.4 en République de Hongrie .....   | 97   |
| 4.2.2.5 en République Socialiste Fédérative<br>de Yougoslavie .....                                      | 97   |
| 4.2.2.6 en République de Bulgarie .....  | 97   |
| 4.2.2.7 en Roumanie .....  | 97   |

|   | Page |
|---|------|
| 4.2.2.8 en Union des Républiques Socialistes<br>Soviétiques .....   | 117  |
| 4.3 <u>Prévisions du régime des glaces</u>  | 117  |
| 4.3.1 <u>Méthodes de formulation des prévisions<br/>à longue échéance de l'apparition de<br/>glaces sur le Danube</u> | 117  |
| 4.3.1.1 en République Fédérale d'Allemagne..  | 117  |
| 4.3.1.2 en République d'Autriche .....  | 118  |
| 4.3.1.3 en République Fédérative Tchèque et<br>Slovaque .....   | 118  |
| 4.3.1.4 en République de Hongrie .....  | 118  |
| 4.3.1.5 en République Socialiste Fédérative<br>de Yougoslavie .....   | 131  |
| 4.3.1.6 en République de Bulgarie .....   | 131  |
| 4.3.1.7 en Roumanie .....   | 131  |
| 4.3.1.8 en Union des Républiques Socialistes<br>Soviétiques .....   | 155  |
| 4.3.2 <u>Méthodes de formulation des prévisions<br/>à courte échéance de l'apparition de<br/>glaces sur le Danube</u> | 180  |
| 4.3.2.1 en République Fédérale d'Allemagne..  | 180  |
| 4.3.2.2 en République d'Autriche.....   | 180  |
| 4.3.2.3 en République Fédérative Tchèque et<br>Slovaque .....   | 180  |
| 4.3.2.4 en République de Hongrie .....  | 180  |
| 4.3.2.5 en République Socialiste Fédérative<br>de Yougoslavie .....   | 180  |
| 4.3.2.6 en République de Bulgarie .....   | 180  |
| 4.3.2.7 en Roumanie .....   | 180  |
| 4.3.2.8 en Union des Républiques Socialistes<br>Soviétiques .....   | 181  |

|  | Page |
|--|------|
| 4.3.3 <u>Méthodes de formulation des prévisions<br/>à longue échéance de la rupture des<br/>glaces sur le Danube</u> | 192  |
| 4.3.3.1 en République Fédérale d'Allemagne..   | 192  |
| 4.3.3.2 en République d'Autriche .....   | 192  |
| 4.3.3.3 en République Fédérative Tchèque et<br>Slovaque .....  | 192  |
| 4.3.3.4 en République de Hongrie .....   | 192  |
| 4.3.3.5 en République Socialiste Fédérative<br>de Yougoslavie .....  | 192  |
| 4.3.3.6 en République de Bulgarie .....  | 192  |
| 4.3.3.7 en Roumanie .....  | 192  |
| 4.3.3.8 en Union des Républiques Socialistes<br>Soviétiques .....  | 198  |
| 4.3.4 <u>Méthodes de formulation des prévisions<br/>à courte échéance de la prise du fleu-<br/>ve (Danube)</u>       | 210  |
| 4.3.4.1 en République Fédérale d'Allemagne..   | 210  |
| 4.3.4.2 en République d'Autriche .....   | 210  |
| 4.3.4.3 en République Fédérative Tchèque et<br>Slovaque .....  | 210  |
| 4.3.4.4 en République de Hongrie .....   | 210  |
| 4.3.4.5 en République Socialiste Fédérative<br>de Yougoslavie .....  | 210  |
| 4.3.4.6 en République de Bulgarie .....  | 210  |
| 4.3.4.7 en Roumanie .....  | 210  |
| 4.3.4.8 en Union des Républiques Socialistes<br>Soviétiques .....  | 229  |

### 3. Introduction

Le Recueil d'information "Méthodes de formulation des prévisions hydrologiques à longue et à courte échéance pour les besoins de la navigation sur le Danube" est établi conformément aux Plans de travail de la Commission du Danube pour 1989/1990 et pour 1990/1991.

Les matériaux émanant de divers auteurs, reçus des organisations et instituts hydrologiques compétents de l'Autriche, de l'Allemagne, de la Bulgarie, de la Hongrie, de la Roumanie, de l'Union Soviétique, de la Tchécoslovaquie et de la Yougoslavie ont servi à l'établissement du Recueil d'information.

Le Recueil est dressé en vertu du point h) de l'article 8, Section I du Chapitre II de la Convention relative au régime de la navigation sur le Danube.

Le schéma du projet de recueil a été adopté par décision de la Quarante-sixième session de la Commission du Danube (CD/SES 46/15). Les matériaux exposent, sous forme détaillée, l'expérience acquise par les pays danubiens, et revêtent de l'intérêt pour la navigation. Il est tenu compte de l'aménagement du chenal navigable du Danube au moyen de travaux de régularisation et de la canalisation de certains secteurs du Danube.

Il est à noter que le développement futur des prévisions utilisées dépend des travaux hydrotechniques qui seront effectués sur le Danube.

Les matériaux des pays danubiens montrent qu'il y a des divergences d'ordre morphologique, hydrologique et climatique dans les diverses données et méthodes.

Ayant en vue le caractère spécifique des différents secteurs du Danube, il est proposé d'utiliser ces méthodes en les adaptant aux conditions des différents secteurs du fleuve.

Le Recueil d'information a été approuvé par la Quarante-neuvième session (doc. CD/SES 49/14).

#### 4. Méthodes de formulation des prévisions hydrologiques pour le Danube, utilisées dans les pays danubiens

Cette partie contient les documents reçus de l'Allemagne, de l'Autriche, de la Bulgarie, de la Hongrie, de la Roumanie, de l'Union Soviétique, de la Tchécoslovaquie et de la Yougoslavie. Ces documents diffèrent considérablement les uns des autres et ne répondent pas pleinement aux principes du schéma adopté; ils n'indiquent pas non plus pour quels secteurs concrets ont été utilisées les méthodes de prévision hydrologique. Dans la plupart des documents il n'y a aucun renseignement quant à l'échéance et à l'exactitude des prévisions émises à l'aide des méthodes données.

Les documents reçus sont en majeure partie des articles émanant de divers auteurs ou instituts et par conséquent ils ne répondent pas au schéma adopté. Toutefois, vu le manque d'autres documents de la part des pays, les textes de ces articles sont inclus dans le Recueil d'information dans la forme reçue, avec l'indication du nom de l'auteur ou de l'institut.

##### 4.1 Prévision du niveau d'eau

##### 4.1.1 Méthodes de formulation des prévisions à longue échéance des niveaux d'eau du Danube

##### 4.1.1.1 En République Fédérale d'Allemagne

On n'établit pas de prévision à longue échéance (voir p. 4.1.2.1).

#### 4.1.1.2 En République d'Autriche

Evidemment, le fait que les phénomènes de débit dans le Danube même, ainsi que dans ses affluents les plus importants en Autriche qui prennent leur source dans les Alpes (Inn, Salzach, Traun, Enns) se déroulent si rapidement, permet de faire seulement des prévisions hydrologiques à courte échéance. De plus, les conditions météorologiques, et le régime des débits dans le secteur supérieur du Danube subissent les influences multiples de l'Atlantique et de la Méditerranée et se caractérisent par des variations rapides et imprévues. Ce sont les raisons pour lesquelles on n'établit pas de prévision à longue échéance des niveaux d'eau et des débits en Autriche, mais uniquement des prévisions à court terme.

#### 4.1.1.3 En République Fédérative Tchèque et Slovaque

##### Information sur les méthodes de formulation des prévisions hydrologiques à courte et à longue échéance pour le Danube aux fins des besoins de la navigation

Les prévisions hydrologiques opérationnelles pour le Danube et pour les autres cours d'eau de la République Slovaque sont publiées par la Section d'information hydrologique et de prévision (SIHP) auprès de l'Institut Hydrométéorologique Slovaque. Le travail est axé en particulier sur la formulation des prévisions hydrologiques à courte échéance, sur les principes de la formulation et le contenu de ces prévisions, dont un bref aperçu est exposé ci-après. Il est à remarquer que l'Institut Hydrométéorologique Slovaque ne publie pas de prévisions à longue échéance pour le Danube.

#### A. ALIGNEMENT DE PREVISION ET RECUEIL DES INFORMATIONS

A l'heure actuelle la SIHP publie journallement des prévisions pour cinq alignements de prévision du secteur tchécoslovaque du Danube, à savoir: Bratislava, Gabčíkovo, Medved'ov, Komárno, Sturovo. La publication régulière de prévisions de 24 heures pour Gabčíkovo a commencé le 1<sup>er</sup> mars 1985. Les données pour le secteur tchécoslovaque du Danube et pour les affluents sont recueillies par téléphone. Quelques postes fournissent leurs données au moyen d'instruments de mesure du niveau à distance.

Les données pour les secteurs allemand et autrichien du Danube et pour les principaux affluents sont communiquées par téléphone par le Service hydrologique autrichien, à Vienne (tableau 1). En dehors des niveaux d'eau mesurés à des heures déterminées, on transmet également des données sur les débits et les niveaux d'eau enregistrés le matin aux stations hydrométriques de Ybbs, Kienstock et Vienne ainsi que la prévision du niveau d'eau à Vienne pour le jour suivant.

En cas de changement prononcé du niveau en période de crues, l'échéance de la prévision pour Vienne est réduite à 6 heures.

Tableau N° 1

| P o s t e                | Cours d'eau | Le jour précédent |                |                | Le jour donné<br>à 6/7 heures |
|--------------------------|-------------|-------------------|----------------|----------------|-------------------------------|
|                          |             | à 14/15<br>heures | à 19<br>heures | à 23<br>heures |                               |
| Schwabelweis             | Danube      |                   |                |                | H                             |
| Hofkirchen               | Danube      |                   |                |                | H                             |
| Passau                   | Danube      |                   |                |                | H                             |
| Salzburg                 | Salzach     |                   |                |                | H                             |
| Schärding                | Inn         |                   |                |                | H                             |
| Passau                   | Inn         |                   |                |                | H                             |
| Wels                     | Traun       |                   |                |                | H                             |
| Steyer                   | Steyer      |                   |                |                | H                             |
| Engel-<br>hartszell      | Danube      |                   |                |                | H                             |
| Linz                     | Danube      |                   | H              |                | H                             |
| Mauthausen               | Danube      |                   |                |                | H                             |
| Ybbs                     | Danube      | H                 | H              | H              | H/Q                           |
| Melk                     | Danube      |                   |                |                | H                             |
| Kienstock                | Danube      | H                 | H              | H              | H/Q                           |
| Wien                     | Danube      | H                 | H              | H              | H/Q/H                         |
| Hainburg                 | Donau       |                   |                |                | H                             |
| Wien-Schwe-<br>denbrücke | Donaukanal  |                   |                |                | H                             |
| Oponitz                  | Ybbs        |                   |                |                | H                             |
| Greimpersdorf            | Ybbs        |                   |                |                | H                             |
| Hohenau                  | Morava      |                   |                |                | H                             |
| Bratislava               | Danube      | H/Q               | H/Q            | H/Q            | H/Q                           |
| Gabčíkovo                | Danube      | H                 | H              | H              | H                             |
| Medved'ov                | Danube      |                   | H/Q            |                | H/Q                           |
| Komárno                  | Danube      | H/Q               | H/Q            |                | H/Q                           |
| Šturovo                  | Danube      | H                 | H              |                | H                             |
| Moravský Ján             | Morava      |                   | H/Q            |                | H/Q                           |
| Záhorská Ves             | Morava      |                   | H/Q            |                | H/Q                           |
| Šalà                     | Váh         |                   |                |                | H/Q                           |

## B. TEMPS DE PROPAGATION DE LA CRUE ET ECHEANCE DE LA PREVISION

Le temps de propagation de la crue sur les différentes sections est donné sous forme graphique. La relation graphique entre le niveau d'eau à la station hydrométrique supérieure et le temps de propagation de la crue entre les stations supérieure et inférieure est construite sur la base de l'écart de temps entre l'arrivée de la crue maximum à la station hydrométrique supérieure et son arrivée à la station hydrométrique inférieure.

La SIHP utilise les courbes du temps de la propagation sur les différents secteurs du Danube entre Linz et Šturovo. Pour le secteur Vienne-Bratislava le temps de propagation varie entre 8 heures en période des basses-eaux et 24 heures en période de hautes-eaux.

La station hydrométrique la plus en amont dont on peut tenir compte à l'heure actuelle pour la formulation des prévisions courantes est la station hydrométrique de Ybbs. Le temps de propagation de Ybbs à Bratislava varie entre 18 et 40 heures.

La SIHP publie chaque jour des prévisions hydrologiques avec une échéance de un jour pour tous les alignements de prévision sur le Danube. Si le niveau d'eau à Bratislava tombe à moins de 300 cm on publie NIVGAR, c'est-à-dire une prévision de 48 heures pour Bratislava et de 72 heures pour Komárno.

Durant la construction de la centrale hydraulique de Gabčíkovo-Nagymaros, aux fins de la protection de cet ouvrage on publie tous les vendredis pour Bratislava une prévision de 48 heures avec l'indication des tendances pour 72 heures.

En période de crues les intéressés reçoivent les renseignements portant sur la date et la hauteur pronostiquées des niveaux culminants.

C. METHODE BASEE SUR LES CHANGEMENTS CORRESPONDANTS DES NIVEAUX D'EAU

La méthode est fondée sur la supposition qu'il existe une relation simple entre le changement de niveau survenu en 24 heures à deux postes hydrométriques.

$$H_{t+24}^D = H_t^D + \mathcal{L} (H_{t+24-\tau}^H - H_{t-\tau}^H)$$

où

$H_{t+24}^D$  - niveau d'eau pronostiqué pour le poste inférieur

$H_t^D$  - niveau d'eau effectif au poste inférieur

$H_T^H$  - niveau d'eau au poste supérieur au moment T

$\tau$  - temps de propagation entre les postes supérieur et inférieur

t - temps effectif

$\mathcal{L}$  - coefficient

Pour la formulation des prévisions on tient compte des sections suivantes:

| Section  | Coefficient  |
|--|--|
| Vienne-Bratislava<br>Kienstock } Gabčikovo<br>Vienne }<br>Bratislava } | $\mathcal{L} = 1$<br>$\mathcal{L} \in \{0,5; 0,6; 0,7\}$ |
| Bratislava-Medved'ov   | $\mathcal{L} = 0,7$                                      |
| Bratislava-Komarno   | $\mathcal{L} = 0,75$                                     |
| Bratislava-Šturovo   | $\mathcal{L} = 0,75$                                     |

Le coefficient constant  $\mathcal{L}$  peut être modifié à discrétion après le premier calcul et ensuite le calcul est à répéter. L'échéance requise pour Vienne (ou Bratislava) est obtenue en reportant le niveau modifié pendant le temps de propagation depuis la section Ybbs-Kienstock jusqu'à la section Kienstock-Vienne et en établissant la relation linéaire avec la prévision publiée pour Vienne.

La méthode mentionnée ci-haut constitue la base du modèle de prévision programmé pour l'ordinateur HP 85, utilisé dans le travail courant. Les données terminales donnent une prévision du niveau d'eau pour 24 heures pour tous les alignements de prévision sur le Danube.

#### D. CORRELATIONS POUR LA CONSTRUCTION DE LA COURBE HYDROGRAPHIQUE DE CRUE

A l'aide de la méthode de corrélation linéaire multiple a été établie la corrélation pour la construction de la courbe hydrographique des crues pour les sections suivantes:

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| Kienstock (Krems) - Bratislava | H + Q |
| Vienne - Bratislava            | H + Q |
| Bratislava - Medved'ov         | H     |

Après les calculs de contrôle des corrélations et leur vérification dans la pratique on a constaté que les données de la relation sont relativement fiables quand l'échéance de la prévision est inférieure ou égale au temps de propagation. A titre d'exemple on peut donner l'équation suivante valable pour la section entre Kienstock et Bratislava:

$$H_{t+\tau}^B = 0,942 H_t^K - 0,042 H_t^W + 0,576 H_t^B - 18,9$$

$$Q_{t+\tau}^B = 0,815 Q_t^K - 0,142 Q_t^W + 0,413 Q_t^B - 84$$

où

$H_{t+\tau}^B$  - prévision pour Bratislava pour l'intervalle de temps  $t + \tau$

$H_t^K, H_t^W, H_t^B$  - niveau d'eau au moment de la publication de la prévision pour Kienstock, Vienne et Bratislava.

#### E. PREVISIONS COURANTES FONDEES SUR LES DEBITS

Pour lesdites méthodes de prévision on utilise un ordinateur qui décrit le processus de progression de la vague de crue à partir de l'alignement supérieur jusqu'à l'alignement inférieur. Plusieurs méthodes du type donné reflètent (plus ou moins clairement) dans leur algorithme le phénomène de l'accroissement du débit total comme le résultat de l'influence du bassin versant intermédiaire même quand l'apport d'eau latéral n'est pas mesuré directement.

Fin 1984, la SIHP a commencé à utiliser un programme permettant de dresser le modèle mathématique du débit en se servant de quelques types de modèles hydrologiques. Ce système de programmation permet de formuler des prévisions couran-

tes du débit d'eau du Danube en se fondant sur les données reçues régulièrement à partir du profil de jauge d'Ybbs en Autriche jusqu'au dernier profil de jauge à Sturovo. Ce système de programmation prépare journallement les prévisions pour les divers alignements de prévision par le biais des calculs alternatifs, c'est-à-dire que l'on calcule la prévision pour chaque alignement en utilisant quelques-uns des modèles déjà introduits. Les résultats définitifs servent au service hydrologique comme matériel de base pour la publication de la prévision définitive qui est diffusée ensuite aux divers utilisateurs.

Dans le cadre du système on utilise à l'heure actuelle les modèles suivants:

$\beta$  - méthode du coefficient de l'apport d'eau

La méthode est fondée sur la connaissance empirique de l'analogie entre le processus du débit résultant des précipitations ou de la fonte des neiges provenant du bassin versant jusqu'à l'alignement supérieur et le débit d'eau provenant du bassin versant intermédiaire. Pour établir la formule du processus de transformation dans le cours d'eau principal, on utilise un modèle de canal avec un temps de propagation qui n'est pas en relation linéaire avec la valeur du débit. Pour la programmation et la pronostication du coefficient de l'apport on utilise la méthode adaptée du type de filtration. Cette méthode est surtout valable pour les pronostics afférents aux sections où l'apport secondaire n'est pas mesurable.

### ARMA - modèle linéaire stochastique avec une partie autorégressive et glissante

Pour apprécier le débit des paramètres inconnus on utilise la méthode adaptée du type de filtration. L'évaluation des séries mathématiques de la formule et l'évaluation initiale des paramètres et des caractéristiques stochastiques se font par off-line à l'aide de l'extraction de la racine.

Dans le cadre du système on prépare à l'heure actuelle l'utilisation des modèles suivants:

NLN - modèle de cascade des bassins non linéaires, proposé pour le calcul de la première mesure du courant non stabilisé dans les lits de fleuve. Le modèle de la section de fleuve représente une cascade de bassins similaires non linéaires où l'apport d'eau sur la section de fleuve donnée représente l'apport dans le premier bassin fictif de la série; le débit d'eau de ce bassin constitue l'affluence dans le deuxième bassin de la série fictive, et ainsi de suite jusqu'au dernier bassin, qui représente le débit d'eau de toute la section de fleuve. La fonction de transformation a une forme exponentielle avec un schéma itératif d'évaluation.

### RIMO - modèle non linéaire de seuils

Ce modèle non linéaire est une combinaison de deux ou plusieurs modèles linéaires différents fonctionnant parallèlement. La fonction de transformation des divers modèles linéaires est donnée sous forme de réaction d'impulsion. La synthèse de la courbe hydrographique de sortie est exécutée par la méthode de convergence. L'estimation des ordonnées de la réaction d'impulsion est faite séparément.

MUSKINGUM - modèle hydrologique linéaire conceptionnel à deux paramètres. L'un des paramètres exprime l'importance de l'apport et de l'écoulement sur le secteur considéré dans le volume d'eau accumulée sur le secteur. Le deuxième paramètre est le coefficient du volume qui exprime le temps de retardement. Pour le calcul des paramètres inconnus ont été choisies la méthode graphique et la méthode de contrôle des erreurs.

F. CORRELATION POUR LES NIVEAUX ET LES DEBITS DE CRUES MAXIMA

Les corrélations régressives pour les niveaux et les débits de crues maxima ont été établies pour les secteurs suivants:

|                        |   |   |
|------------------------|---|---|
| Linz - Bratislava      | H | Q |
| Ybbs - Bratislava      | H | Q |
| Kienstock - Bratislava | H | Q |
| Vienne - Bratislava    | H | Q |
| Bratislava - Medved'ov | H |   |
| Bratislava - Komárno   | H | Q |
| Bratislava - Šturovo   | H |   |

où H - niveau d'eau (en cm); Q - débit d'eau (en m<sup>3</sup>/sec)

Les corrélations susmentionnées ont été établies pour diverses combinaisons de variables. Les corrélations vérifiées et les plus fiables ont été incluses dans le programme de l'ordinateur HP-85.

A titre d'exemple, on peut citer le secteur Kienstock-Bratislava

$$H_B = 0,697H_K + 0,225 h_{BK} + 0,088 h_{MJK} + 45,6$$

$$Q_B = 0,719 Q_K + 0,261q_{BK} + 0,633q_{MJK} + 263$$

- où
- $H_B$  - niveau de crue maximum pronostiqué à Bratislava
- $H_K$  - niveau de crue maximum à Kienstock
- $h_{BK}$  - niveau d'eau à Bratislava au moment où le niveau d'eau à Kienstock atteint la hauteur maximum
- $h_{MJK}$  - niveau d'eau à Moravsky Ján (Morava) au moment du niveau de crue maximum à Kienstock
- $Q_B$  - débit d'eau culminant pronostiqué à Bratislava
- $Q_K$  - débit d'eau culminant à Kienstock
- $q_{BK}$  - débit d'eau à Bratislava au moment de la culmination à Kienstock
- $q_{MJK}$  - débit d'eau à Moravsky Ján au moment de la culmination à Kienstock.

Pour les sections susmentionnées des corrélations analogiques ont été établies par la méthode de corrélation graphique.

#### G. ORDINATEURS UTILISES

Pour la préparation, le contrôle et l'emploi des prévisions on utilise des ordinateurs. Pour les travaux de recherches scientifiques dans le domaine de l'établissement des modèles de débit on a d'abord utilisé les ordinateurs du type EC 1040. Les tâches principales de l'établissement du modèle sont résolues et elles le sont aujourd'hui encore à l'aide dudit ordinateur. L'ordinateur EC 1040 permet de trouver

des solutions à des travaux de grande envergure, toutefois, il ne peut servir pour la solution des tâches opératives. Pour la préparation des procédés de formulation des prévisions hydrologiques en vue de leur utilisation pratique on se sert en premier lieu de l'ordinateur HP-85. Les résultats des programmes auxiliaires représentent des modèles vérifiés pour les secteurs de fleuve respectifs. Ces modèles sont utilisés dans le cadre de la programmation pour l'ordinateur HP 85.

Tenant compte de l'introduction graduelle des mesures automatisées à l'aide de stations hydrologiques automatiques du type AGC, on a créé un système à machines multiples pour le rassemblement des informations SPU 800 et SM 50/40. D'autres sortes d'informations (météorologiques, de radiodétection, etc.) sont à l'heure actuelle recueillies par l'ordinateur de télécommunication EC 1011. Un terminal est en voie de préparation pour les besoins de SIHP.

Le fonctionnement du service d'informations comprenant la collecte, le traitement et la mise à disposition des données sera assuré par l'ordinateur SM 4/20 dont la mise en service est préparée actuellement par le service SIHP. Pour cette raison, les divers programmes de prévision sont actuellement révisés afin de mettre sur pied un système de prévision global dans le cadre de l'ordinateur SMEP avec une seule banque de données qui seraient régulièrement complétées par les données d'observation. Dans le cadre du système de prévision, la banque de données utilisera tous les modèles de prévision (méthode basée sur les changements correspondants des niveaux d'eau, corrélation régressive et méthodes permanentes basées sur les débits).

## H. INFLUENCE DES ACTIVITES HUMAINES SUR LA PREVISION

En résultat de la modification du régime d'écoulement dans le bassin versant, conditionnée par les activités humaines, les procédés utilisés se modifient systématiquement. Les activités humaines dans le bassin du Danube sont, d'une part, de caractère disséminé (agriculture, amélioration, économie forestière, et autres activités) et, d'autre part, de caractère concentré, ce qui résulte de la construction des divers ouvrages hydrotechniques et des travaux de régularisation.

Les activités humaines sont, du point de vue de la prévision, un facteur qui agit défavorablement sur la qualité de la prévision. Surtout en résultat des activités dans les bassins sur le Danube ou sur ses affluents on constate une réduction du temps de propagation et une modification du caractère de l'écoulement. Prenant en considération les retenues et les changements du volume du débit dans certains bassins (ouvrages) ainsi que la montée à rebours des niveaux inférieurs résultant du travail des ouvrages hydrotechniques, les résultats des mesures dans la majorité des profils de jauge du secteur autrichien du Danube n'offrent pas un tableau réel de la situation hydrologique dans le bassin versant.

Par suite des surfaces d'accumulation réduites des ouvrages hydrotechniques sur le Danube, le seul facteur défavorable du point de vue de la prévision est la présence de vagues non régulières d'une hauteur faible ne dépassant pas en général 20-40 cm de la hauteur en régime normal dans le profil de jauge de Bratislava. Aux autres profils de jauge du secteur tchécoslovaque,

l'influence des ouvrages hydrotechniques autrichiens diminue graduellement. En période de gros débits ou des débits de grosses crues l'influence du fonctionnement des ouvrages hydrotechniques est faible. Sur le secteur tchécoslovaque du Danube, ce sont surtout l'approfondissement du lit du Danube à proximité de Bratislava et les divers travaux de régularisation exécutés en connexion avec la construction des centrales hydrauliques de Gabčíkovo-Nagymaros qui font sentir leur effet. Avec la création des centrales hydrauliques la situation en matière de prévision subira un changement radical au point de vue des mesures et des prévisions. Pour éliminer ou réduire au minimum dans le bassin versant l'influence des activités humaines sur la formulation des prévisions la SIHP emploie deux méthodes. La première est celle du changement des procédés de prévision basés sur les données de la dernière période. Il est question d'introduire de nouveaux paramètres de corrélation pour les prévisions. La deuxième méthode consiste en l'adaptation régulière du pronostic aux conditions hydrologiques changeantes à l'aide d'algorithmes adaptatifs inclus dans la méthode utilisée.

La construction de centrales hydrauliques sur le Danube entraîne l'élimination graduelle du fonctionnement des stations hydrométriques de base pour les prévisions.

La construction du canal d'aménée à Vienne a une influence considérable sur la prévision des niveaux et des débits d'eau. Quand on ne connaît pas le débit total du Danube à Vienne (du Danube même et des deux canaux) en cas d'inondation la possibilité de formuler une prévision en se fondant sur les données de la station de Vienne est fort limitée.

## I. PREVISIONS A LONGUE ECHEANCE POUR LE DANUBE

La Commission du Danube publie des prévisions à longue échéance (un mois) qui, sur le secteur tchécoslovaque du Danube, se rapportent à la station hydrométrique de Komárno. Les données de la prévision ont un caractère informatif.

Les prévisions à échéance moyenne sont les suivantes:

Conformément à la décision de la Commission du Danube, quand les niveaux à Bratislava baissent à 300 cm les prévisions NIVGAR sont publiées régulièrement, avec une échéance de deux jours pour Bratislava et de trois jours pour Komárno. La fiabilité de la prévision est de 50 cm quand les niveaux d'eau sont de 300-270 cm à Bratislava, de 40 cm pour les niveaux d'eau de 270-240 cm et de 30 cm pour les niveaux de 240 cm et moins. Pour formuler des prévisions à échéance moyenne a été élaborée une méthode fondée sur les courbes de l'appauvrissement du débit qui ne sont utilisées qu'à titre d'orientation du fait des activités humaines dans le bassin versant du Danube.

- Dans le cadre de la protection des ouvrages de la centrale hydraulique sur le Danube on publie une fois par semaine (le vendredi) une prévision du niveau d'eau pour Bratislava avec une échéance de deux jours et les tendances du niveau pour trois jours.

## J. PROGRAMME DE PERFECTIONNEMENT DES PREVISIONS HYDROLOGIQUES POUR LE DANUBE

L'effet des activités humaines sur le régime hydrologique du cours supérieur du Danube est sensible. La construction d'un système de bassins et de canaux a provoqué une accélération

du processus d'écoulement du débit, c'est-à-dire une réduction du temps de propagation. Un autre fait défavorable lié à la construction des ouvrages hydrotechniques et exerçant une influence sur la formulation des prévisions est la suppression des principaux postes hydrologiques. Dans la majorité des cas les nouveaux profils de jauge ne donnent pas un tableau réel de la situation hydrologique et faussent ainsi les valeurs envisagées.

Il conviendra de tenir compte de ce fait dans la méthodologie de formulation des prévisions.

Il serait désirable d'examiner la possibilité de la poursuite d'un travail accompli en commun par des experts de l'Autriche, de la Tchécoslovaquie et de la Hongrie dans le cadre de la Commission du Danube afin de créer un modèle unique de prévision des niveaux et des débits d'eau.

#### 4.1.1.4 En République de Hongrie

(voir 4.2.1.4)

#### 4.1.1.5 En République Socialiste Fédérative de Yougoslavie

(voir 4.1.2.5)

#### 4.1.1.6 En République de Bulgarie

Prévisions mensuelles opérationnelles à long terme des niveaux minima sur le secteur bulgare

Institut d'Hydrologie et de Météorologie  
BAN, 66 boulevard Lénine, Sofia, 1184, Bulgarie

## Résumé

L'étude actuelle a pour objectif l'établissement des prévisions mensuelles à long terme des niveaux minima sur le secteur bulgare du Danube, dans le cadre du recueil d'informations et de la publication des prévisions opérationnelles. Les principes fondamentaux de la formation des équations des prévisions sont exposés au début de l'étude. La méthode physico-statistique employée offre la possibilité d'utiliser directement les informations sur les activités atmosphériques pour les modèles de la prévision, et ce au moyen de la dispersion en séries selon les fonctions naturelles orthogonales (FNO) des champs de géopotentiel, du géopotentiel relatif etc. La fiabilité des prévisions a été évaluée sur la base d'une documentation indépendante, par la méthode  $S/\sigma$  (contrôle par glissement). Pour les 20 dernières années cette corrélation est de l'ordre de 0,41-0,59. La valeur des erreurs absolues relevées au cours de la période d'octobre 1984 à janvier 1985 est en moyenne de 30 cm.

## Introduction

La prévision à long terme des niveaux minima du Danube joue un rôle important dans la gestion économique de ce grand fleuve pour les besoins de la navigation, de l'exploitation des ouvrages hydrotechniques, etc. Le bassin versant du Danube s'étend sur le territoire de divers Etats européens, et la collecte opérationnelle des données par éléments du bilan d'eau n'est pas encore réalisée. En outre, la fiabilité des prévisions à long terme des précipitations est faible. Partant du fait que l'activité atmosphérique est un facteur essentiel dans la formation du régime des niveaux minima, c'est la méthode physico-statistique qui a été choisie pour l'é-

tablissement des prévisions. Cette méthode se fonde sur la supposition empirique de l'existence de relations linéaires entre la fluctuation temporaire des champs atmosphériques de l'hémisphère boréal, dénommés "régions d'information maxima" (RIM), et la valeur pronostiquée, avec un certain décalage temporel. Les principales questions à résoudre sont de trouver la disposition optimale des RIM, les champs atmosphériques respectifs, d'obtenir la sommation des prévisseurs des équations prévisionnelles optima dans les données d'entrée opérationnelles et une fiabilité suffisante des prévisions.

### Méthode de la recherche

La méthode physico-statistique prévoit comme premier pas l'établissement de la disposition optima des RIM. A cette fin (Dimitrov 1985), on calcule les coefficients pairs de la corrélation du prédicteur (niveaux mensuels minima) et les valeurs moyennes mensuelles du champs atmosphérique respectif, avec un décalage temporel des noeuds de la grille régulière de l'hémisphère boréal. On établit la carte des isocorrélations qui est à la base de la recherche des zones de relations linéaires accrues entre les champs atmosphériques et les prédicteurs. A chaque valeur pronostiquée correspond une série de cartes d'isocorrélations, pour les différents champs atmosphériques et les différents décalages temporels. S'appuyant sur l'analyse, on choisit uniquement les noeuds de la grille régulière pour lesquels les coefficients de corrélation ont été calculés avec une fiabilité de probabilité 0,95, ce qui est d'une grande portée. Les paramètres RIM sont déterminés en tenant compte du nombre de ces noeuds dans chaque zone (au moins 6-8) ainsi que du décalage temporel (au moins 2 mois).

Le pas suivant dans la sommation de l'information est la répartition des champs atmosphériques des RIM en les séries de composants principaux; les fonctions naturelles orthogonales FNO (Bagrov, 1959). Ici, il importe d'établir le nombre des termes significatifs intervenant dans la décomposition. L'évaluation des significatifs s'effectue à l'aide des critères de dispersion standardisés; en général, pour que la dispersion dépasse de 95% le niveau de la dispersion du champ initial, il suffit de se limiter à 6-8 termes. C'est pour cette raison que, par la suite, il a été adopté pour chaque cas de l'ensemble des prédicateurs éventuels la méthode d'inclusion des dix premiers coefficients de la décomposition selon FNO et dans les RIM.

L'ensemble des prédicateurs éventuels est aussi complété par des données de l'hydraulicité antérieure (Zmieva et d'autres, 1978) qui représentent les niveaux minima mensuels dans le profil de jauge considéré et qui ont précédé la période du prédicateur, avec un décalage d'au moins 2 mois. Ainsi, on compare à chaque prédicateur l'ensemble des valeurs des prévisions éventuelles. Le nombre des RIM pour chaque prédicateur est en général de 2-3, tandis que les valeurs des prévisseurs éventuels sont de 30-40. On utilise comme méthode efficace pour le criblage des prévisseurs la méthode de régression successive (Efroimson, 1962). Ici on applique la variante dans laquelle intervient la dernière valeur, qui est reprise de la méthode d'inclusion selon le critère de Fischer. On utilise comme base d'établissement de l'algorithme, le paquet des programmes appliqués (IBM-SSP, vers.3). De plus, a été créée la possibilité d'émettre des prévisions de contrôle indépendantes formulées selon la méthode de glissement et du calcul du rapport de dispersion pour l'évaluation

de la fiabilité des prévisions  $S/6$ . En outre, en utilisant l'équation de prévision on publie des prévisions opérationnelles basées sur les données instantanées des prévisseurs.

### Données de base

En premier lieu a été étudiée la fréquence de l'apparition du niveau minimum annuel absolu sur le secteur bulgare, répartie par mois de septembre à février, pour les dernières 60 années. Il s'est avéré que la fréquence maximum (Dimitrov, 1985) de la valeur minimum annuelle se présente en novembre et décembre et de plus, les valeurs absolues les plus basses sont enregistrées au cours de ces mêmes mois. De même, a été étudiée la relation linéaire entre les niveaux minima mensuels relevés à divers profils de jauge du secteur bulgare. Les coefficients de corrélation pairs sont fort élevés (0,93-0,96) ainsi il suffit de publier des prévisions pour un seul point. Ayant en vue la nécessité d'avoir une courbe de débit constante, c'est le profil de jauge de Svistov qui a été choisi pour la prévision, et comme prédicateurs on a utilisé les niveaux minima mensuels pour les quatre mois d'octobre à janvier. Le contrôle par la glissante a été effectué pour la période de 1964 à 1983 et les prévisions opérationnelles ont été publiées pour 1984/1985.

Lors de l'établissement de l'ensemble des prédicateurs possibles, on a eu recours aux valeurs moyennes mensuelles de 1000 à 500 mb pour les champs du géopotentiel et de 1000/500 mb pour le géopotentiel relatif du sol dans les noeuds de la grille régulière dépassant  $20^\circ$  de latitude nord auprès de  $10^\circ$  de longitude et  $5^\circ$  de latitude. La recherche des RIM est réalisée avec décalage temporel de 6 à 2 mois par rapport au

prédicateur respectif. Les niveaux mensuels minima ont été inclus en tant que prédicateurs éventuels avec respectivement un décalage de 4-2 mois.

### Formation des équations des prévisions

La figure N° 1 présente le schéma de l'établissement de l'algorithme et la succession des données opérationnelles d'entrée et du traitement des informations aux fins de l'émission des prévisions à long terme. Il convient de rappeler que les archives des valeurs moyennes mensuelles sont complétées au moyen de l'établissement de la moyenne des valeurs journalières communiquées télégraphiquement selon le code GRID de l'OMM, 0 heure GMT.

### Résultats

Au moyen de l'indication par Hm des prédicateurs des niveaux mensuels M d'octobre (X) à janvier (I) et par  $T_{pi}^M$  des coefficients de dispersion des champs atmosphériques ( $H_i-H500$ ,  $P_i-h1000$ ,  $O_i-OT500/1000$ ), du mois M et du numéro d'ordre i on obtient l'équation de prévision qui se présente comme suit:

$$H_x = -0,25 T_{H1}^8 - 0,63 T_{p1}^5 + 1,01 T_{H5}^3 + 2715 \quad (1)$$

$$H_{xi} = 1,78 T_{p1}^6 + 0,87 T_{p1}^5 - 1568 \quad (2)$$

$$H_{xi1} = 0,32 T_R^{10} + 0,44 T_{p1}^5 + 2,02 T_{p1}^{10} - 281 \quad (3)$$

$$H_1 = -0,30 T_{H1}^9 + 0,35 H_{xi} + 0,27 T_{P10}^1 - \\ - 1,4 T_{P10}^7 + 576 \quad (4)$$

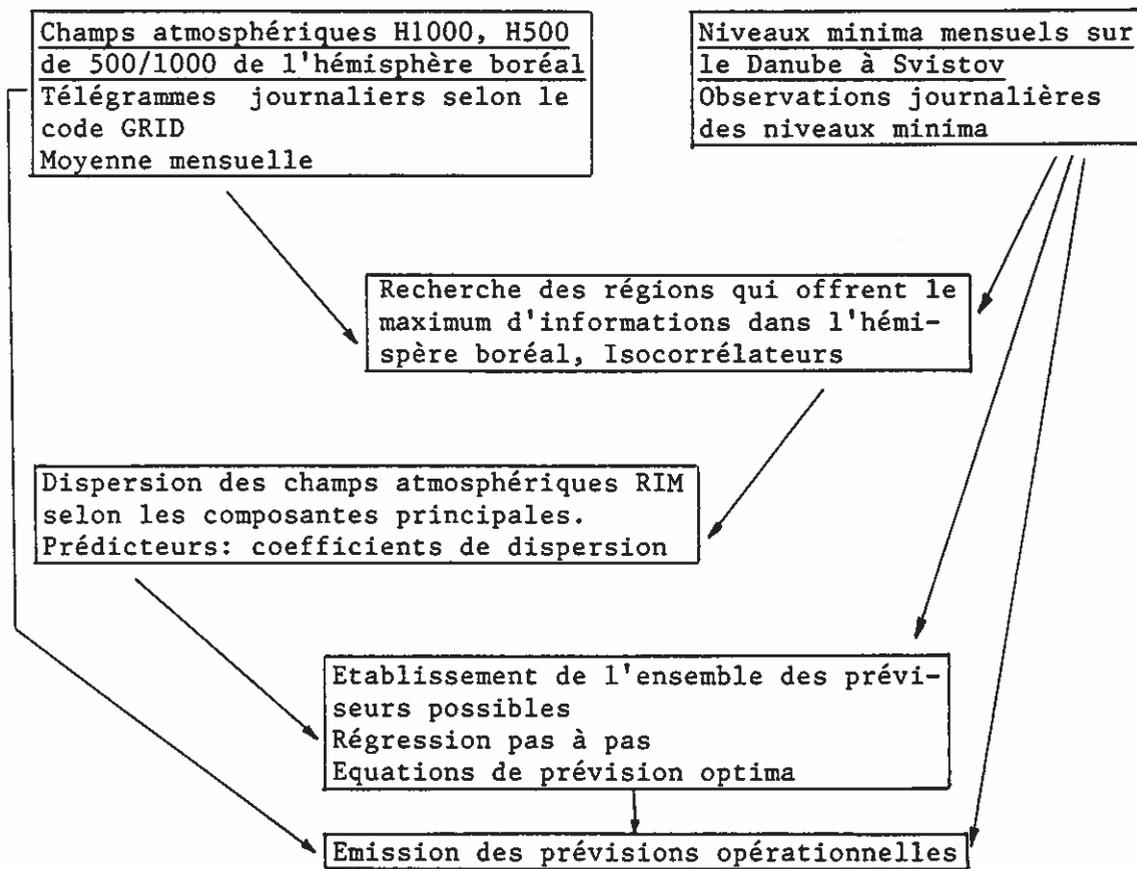


Figure N° 1 - Schéma de l'algorithme et du traitement des informations

Les régions qui donnent le maximum d'informations figurent dans le tableau N° 1. Il en découle que chaque prédicteur a trois régions avec différents décalages temporels. Ceci s'explique probablement par le fait que les processus de formation du régime de l'écoulement minimum sont en différentes relations avec l'activité

atmosphérique. Il est supposé que les paramètres atmosphériques forment indirectement le débit minimum car ils contiennent l'élément de fluctuation temporaire qui, par l'entremise des éléments du cycle hydrologique, représente la variabilité minimum temporaire des niveaux.

Tableau N° 1 - Régions d'informations maxima dans l'hémisphère boréal

| Prédicateur | Région |      |               |               | Région |      |               |               |
|-------------|--------|------|---------------|---------------|--------|------|---------------|---------------|
|             | Champs | Mois | Latitude Nord | Longitude Est | Champs | Mois | Latitude Nord | Longitude Est |
| X           | AT500  | V    | 25-40         | 50-70         | P1000  | VII  | 55-70         | 230-250       |
|             | AT500  | VIII | 30-50         | 180-200       |        |      |               |               |
| XI          | P1000  | IV   | 15-30         | 280-320       | P1000  | V    | 55-65         | 70-100        |
|             | P1000  | VIII | 55-70         | 300-330       |        |      |               |               |
| XII         | P1000  | X    | 50-65         | 40-80         | DT5/1  | V    | 30-45         | 330-350       |
|             | AT500  | X    | 35-60         | 310-330       |        |      |               |               |
| I           | P1000  | X    | 60-75         | 140-190       | AT500  | IX   | 45-65         | 130-160       |
|             | AT500  | VII  | 40-60         | 260-280       |        |      |               |               |

Tableau N° 2 - Appréciation des équations des prévisions

| Mois |      |      |      | Niveau | Prévision | Ecart |
|------|------|------|------|--------|-----------|-------|
|      |      |      |      |        |           |       |
| X    | 0,59 | 0,83 | 12,0 | 175    | 207       | -32   |
| XI   | 0,57 | 0,83 | 19,1 | 98     | 71        | 27    |
| XII  | 0,46 | 0,90 | 22,4 | 115    | 150       | -35   |
| I    | 0,41 | 0,93 | 23,8 | 61     | 250       | -189  |

L'appréciation de la fiabilité de la méthode de prévision et de l'exactitude de la prévision est fondée sur une documentation indépendante par la méthode des glissantes, en utilisant  $S/\bar{S}$ . Analysant le tableau N° 2 on peut affirmer que la relation de dispersion  $S/\bar{S}$  varie dans les limites de 0,4-0,6 et satisfait aux exigences de l'OMM à l'égard des modèles de la pratique opérationnelle. Le même tableau indique les valeurs des coefficients calculés par la corrélation multiple et le critère de Fischer, qui peuvent être utilisés comme information complémentaire sur la fiabilité des relations pronostiquées obtenues. A la fin du tableau N° 2 on indique les niveaux minima mensuels enregistrés et pronostiqués de décembre 1984 à janvier 1985. A l'exception du dernier mois, où il y a eu des embâcles, les prévisions ont une bonne fiabilité.

#### Liste des publications

- Багров Н.А. (1959). Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих. Труды ЦИП, вып.74, Гидрометиздат, 16-34.
- Димитров Д. (1985). Долгосрочное прогнозирование месячных минимальных уровней реки Дунай. Известия ИГМ - БАН, т.1, Издательство БАН, 142-157.
- Efroimson M.A. (1962). Mathematical Methods for Digital Computers. John Wiley and Sons, New York, 17th chapt.
- Змиева Е.С., Климова В.В. (1977). Минимальные уровни воды р.Дунай в осенний период и возможности их прогноза. 9 конф. придунайских стран по гидрологическим прогнозам, Комиссия придунайских стран, 73-82.
- IBM Scientific Subroutine Package Version - III (1966). IBM Technical Publications Department. New York, 230-265.

4.1.1.7 En Roumanie

Voir pp. 4.2.1.7 et 4.2.2.7

4.1.1.8 En Union des Républiques Socialistes Soviétiques

Méthode de formulation des prévisions de niveaux et de débit d'eau du Danube, fondée sur la loi de l'épuisement des réserves d'eau dans le lit et sur l'utilisation de l'analyse des composantes

V.M. Muhine, Centre hydrométéorologique de l'URSS

Formulation générale de la tâche. Au Centre hydrométéorologique de l'URSS ont été élaborées les méthodes de la formulation des prévisions de niveaux et de débits d'eau caractéristiques (maxima, moyens et minima) pour des périodes à 10, 15 et 20 jours, de la prévision de débits d'eau garantis pour certains profils de jauge du Danube. L'une de ces méthodes tient compte de l'influence qu'exercent sur le débit d'eau au profil de jauge donné les réserves d'eau et leur répartition le long du lit en amont de ce profil de jauge, tandis que dans l'autre méthode on prend en compte en outre les précipitations dans le bassin versant. La méthode de la prévision de débits garantis a recours à la loi de l'épuisement des réserves d'eau dans le lit.

Pour obtenir les paramètres inconnus des modèles utilisés dans les méthodes de prévision ci-haut mentionnées, on emploie l'analyse des composantes et le procédé d'optimisation.

Le volume d'eau  $W_j$  sur le secteur  $j$  du lit peut s'exprimer approximativement de la manière suivante:

$$w_j = 0,5 l_j (w'_j + w'_{j+1}), \quad (1)$$

où

$w'_j$  - surface de la section mouillée aux profils de jauge;

$l_j$  - longueur des secteurs entre les profils de jauge.

La relation entre la surface de la section mouillée et le niveau d'eau  $H$  au profil de jauge  $j$  peut être formulée à l'aide de la corrélation

$$w'_j = a_j (H_j + d_j)^{b_j} \quad (2)$$

où

$a_j$ ;  $d_j$  et  $b_j$  = paramètres.

Si l'on simplifie la dernière formule en prenant  $b_j = 1$  il est facile de passer, par les niveaux à l'expression linéaire de la réserve d'eau dans le secteur de fleuve  $j$

$$w_j = 0,5 l_j (\alpha_j H_j + \alpha_{j+1} H_{j+1} + \gamma_j) \quad (3)$$

Les erreurs admissibles lors du remplacement des expressions non-linéaires par des expressions linéaires peuvent amoindrir l'exactitude des prévisions pour les valeurs de niveau extrêmes. Toutefois, l'expérience montre que les apports d'eau pour la période de l'échéance et l'apport d'eau des tributaires, inconnus au moment de la formulation des prévisions, ainsi que d'autres facteurs non pris en compte, exercent une influence bien plus importante sur les résultats des prévisions.

D'une manière analogue on peut obtenir, à l'aide du débit d'eau et du temps de progression de

l'onde entre les profils de jauge, l'expression du volume d'eau dans le réseau du lit.

Pour obtenir les paramètres de la relation entre le niveau d'eau pronostiqué pour le profil de jauge donné et les réserves d'eau dans la partie amont du réseau fluvial, exprimés par

$$H_{t,k} = \sum_{j=1}^{j=n} \beta_j W_j \quad (4)$$

il est facile de passer, à l'aide de l'équation (3), à l'équation linéaire à paramètres inconnus exprimés par

$$H_{t,k} = \sum_{j=1}^{j=n} X_j H_j + C \quad (5)$$

où

t - moment de la formulation de la prévision;  
 K - période d'échéance de la prévision;  
 H - niveaux aux profils de jauge j du lit principal, ou du réseau fluvial,  $X_j$  et C - paramètres.

La détermination des valeurs numériques des paramètres des modèles linéaires sur la base de l'information connue, appartient à la classe des problèmes inverses et conduit à la nécessité de résoudre un système d'équations normal, qui, sous forme de matrice, peut se formuler comme suit

$$Ax = y \quad (6)$$

où

A - opérateur, représenté par une matrice de corrélation (ou de covariance),  
 y - vecteur de corrélation réciproque des arguments de la fonction pronostiquée à l'aide de ces arguments.

En ce qui concerne l'aspect physique de la tâche; il importe qu'aux petites erreurs dans les données initiales correspondent de petites erreurs dans la solution. Cette exigence est l'une des exigences de la formulation correcte du problème. Lors de la solution des problèmes inverses, dans la prévision hydrologique apparaît un paradoxe qui est lié au fait que le système d'équations présentant ces problèmes est mal fondé; l'introduction de nouveaux facteurs ou de plus amples détails pour l'un des facteurs de temps ou d'espace conduit, en général, à la dégradation de la solution du problème inverse, s'exprimant tant dans l'invraisemblance physique de ces solutions, que dans l'amoindrissement de l'exactitude des prévisions choisies fortuitement.

Les paramètres de l'équation du type (6) sont obtenus à l'aide de l'analyse des composantes ensemble avec les critères du choix de solution, élaborés dans la théorie de la solution des problèmes non-corrects. Une description détaillée de cette méthode et des exemples pratiques de son application figurent dans les travaux (1, 2). Ci-après est donnée seulement l'équation de base à l'aide de laquelle la solution est recherchée

$$\bar{\chi}_\mu = \sum_{j=1}^{\mu < n} (\beta_j / \lambda_j) U_j \quad \beta_j = (y, U_j) \quad (7)$$

où

$\lambda_j$  et  $U_j$  - sont des nombres finis et des vecteurs propres de la matrice de corrélation  $A$ ;  $\beta_j$  - produits vectoriels d'une fonction de corrélation réciproque (partie droite de l'équation (6)) avec des vecteurs propres;  $n$  - ordre du système à résoudre;  $\mu$  - nombre des composantes retenues.

Le choix du nombre ( $\mathcal{L}$ ) des composantes retenues dépend des informations complémentaires (sur la solution, sur les erreurs dans les données initiales, ou d'autres) dont le chercheur dispose.

Lors de l'élaboration de la méthode de formulation des prévisions de niveau d'eau caractéristique pour quelques profils de jauge du Danube, on emploie aussi, ensemble avec l'analyse des composantes, le critère quasioptimal du choix de la solution approchée. Le sens de ce critère est de chercher l'une des plus basses valeurs minima locales de la fonction

$$|\beta_j / \lambda_j| = f(j) \quad (8)$$

Pour obtenir les paramètres des équations prévisionnelles dans lesquelles ont été utilisées les données de débit d'eau, on applique également la méthode d'optimisation. Les paramètres étaient considérés optima quand on a obtenu la valeur minimale de la fonction suivante

$$f(Q_t, Q_{t+k}, X) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N(T-k)} [\bar{Q}_{t+k} - \tilde{Q}_{t+k}(Q_t, X)]^2}{\sum_{i=1}^{N(T-k)} (\bar{Q}_t - \bar{Q}_{t+k})^2}} \quad (9)$$

où

$\bar{Q}_{t+k}$  et  $\tilde{Q}_{t+k}$  - respectivement valeurs effectives et valeurs pronostiquées des débits d'eau;  
 $\bar{Q}_t$  - débits d'eau effectifs au moment de la formulation de la prévision;  $N$  et  $T$  - respectivement, nombre de périodes d'observation et nombre de jours dans chacune d'elles;  $X$  - vecteur des paramètres cherchés.

Afin d'accroître l'exactitude des prévisions décennales des débits moyens à la localité Bezdan on a également employé l'information sur les champs de précipitations en amont de ce point. Les champs de précipitations sont représentés à l'aide des coefficients de décomposition d'après les vecteurs propres de la matrice de corrélation de ces champs.

La décomposition du champ en une série polynôme se présente comme suit

$$F(x,y) = B_{00} + B_{10}U_1(Z) + B_{01}Y_1(\Psi) + B_{11}U_1(Z)Y_1(\Psi)... \quad (10)$$

où

$U(Z)$  et  $Y(\Psi)$  - systèmes des vecteurs propres fondés sur les directions perpendiculaires l'une à l'autre des coordonnées  $Z$  et  $\Psi$  des champs de précipitations.

Evaluation des moyens de formulation des prévisions dans la pratique. La première phase de l'élaboration de la méthode pour la formulation des prévisions, fondée sur l'utilisation des informations sur les niveaux ou les débits d'eau aux stations amont, consiste en l'obtention d'une matrice de corrélation (ou de covariance) ( $\Lambda$ ) pour les séries temporelles des observations à ces stations, ainsi qu'en l'obtention d'une fonction de corrélation réciproque ( $\gamma$ ) entre les observations à la station pour laquelle seront formulées les prévisions et celles des stations amont entrant dans les calculs. La longueur de la série d'observations doit excéder de 10-15 fois le nombre des stations incluses dans le calcul.

Ensuite on calcule les nombres finis  $\lambda_j$ , les vecteurs propres  $U_j$ , les sommes des produits ,

successivement avec chacun des vecteurs propres  $U_j$ , c'est-à-dire les produits scalaires  $\beta_j$ , et on résout l'équation (7) jusqu'à la valeur  $j = \mathcal{L}$ , dans laquelle la fonction  $|\beta_j/\lambda_j|$  a un minimum local très bas à  $j$ .

On doit calculer auparavant les valeurs moyennes pluriannuelles des niveaux et des débits d'eau pour chaque profil hydrométrique, ainsi que la variabilité de l'évaluation de la moyenne quadratique ( $\sigma_k$ ) des niveaux et des débits d'eau pour la période d'échéance des prévisions ( $K$ ) et aussi la variabilité pluriannuelle de ces valeurs ( $\sigma$ ).

La méthode de formulation des prévisions des niveaux et des débits d'eau caractéristiques avec une échéance de 10, 15 et 20 jours est élaborée pour Bezdan, Bogojewo, Novi Sad, Brăila et Tulcea.

La période d'observations choisies par sondage pour la relation, comprenait 195 jours (du 20 mars jusqu'au 1<sup>er</sup> octobre) dans chacune des 8 années (1963-1970), c'est-à-dire plus de 1500 cas d'observation. L'ampleur de la variation des débits d'eau à la station de Bezdan pour cette période était d'environ 5000 m<sup>3</sup>/s.

Pour la formulation des prévisions de niveaux caractéristiques à Bezdan pour des périodes de 10, 15 et 20 jours on utilise les données sur les niveaux mesurés le jour de la formulation de la prévision aux profils de jauge des stations hydrométriques: Regensburg (1), Schärding (2), Wien (3), Linz (4), Bratislava (5), Budapest (6), Mohács (7) et Bezdan (8). Pour la prévision des niveaux à 15 jours on a fait entrer dans l'équation, en dehors des données ci-dessus enregistrées le jour de la formulation

de la prévision  $t$ , les données enregistrées 2 jours plus tôt à ces mêmes stations ( $t_2$ ). L'équation est donnée ci-après:

$$\begin{aligned}
 H_{15} = & 0,11H_{1,t} - 0,04_{1,t-2} + 0,04H_{2,t} - \\
 & - 0,06H_{2,t-2} + 0,45H_{3,t} - 0,30H_{3,t-2} - \\
 & - 0,07H_{4,t} - 0,07H_{4,t-2} + 0,34H_{5,t} - \quad (11) \\
 & - 0,42H_{5,t-2} + 1,03H_{6,t} - 0,75H_{6,t-2} + \\
 & + 0,33H_{7,t} - 0,36H_{7,t-2} + 0,45H_{8,t} + \\
 & + 0,33H_{8,t-2}.
 \end{aligned}$$

Lors de la formulation des prévisions à 10, 15 et 20 jours pour la localité Bogojevo, ont été utilisées les observations enregistrées aux stations suivantes: Regensburg, Wien, Budapest et Bogojevo sur le Danube et Barcs sur la Morava.

Pour pronostiquer les niveaux d'eau à Novi Sad avec échéances de 10, 15 et 20 jours, on utilise les données sur les niveaux mesurés à Bezdán, Budapest, Bratislava, Linz, Regensburg, Schärding et Novi Sad.

L'évaluation de l'efficacité des méthodes de prévision mentionnées, fondées sur le choix indépendant des données de trois années d'observation (1971-1973), 195 jours chaque année, pour les localités Bezdán et Bogojevo se situe entre  $0,45 \overline{G}_k$  et  $0,69 \overline{G}_k$  et pour Novi Sad entre  $0,64 \overline{G}_k$  et  $0,78 \overline{G}_k$ .

Pour Braila les prévisions des niveaux caractéristiques (moyens et minima) sont formulées sur

la base des observations du débit d'eau aux profils de jauge situés en amont: Novo-Selo, Lom, Svistov, Silistra ainsi que des observations du niveau d'eau à Braila même. L'erreur relative des prévisions est de  $0,63\% - 0,66\%$ .

En ce qui concerne les équations utilisées pour la prévision des débits minima et moyens à 10 et 20 jours pour Tulcea, les erreurs relatives se situent dans les limites  $0,49\% - 0,65\%$ .

Dans ces équations, les arguments sont les observations du débit à Tulcea (1), Novo-Selo (2), Lom (3), Svistov (4) et Silistra (5). Un exemple d'équation pour la prévision des débits minima avec échéance de 20 jours est présenté ci-après:

$$20 = 0,36Q_{1,t} + 0,29Q_{2,t} + 0,01Q_{3,t} + 0,31Q_{4,t} + \quad (12)$$

$$+ 0,01Q_{5,t}.$$

Le calcul de la répartition des précipitations dans le bassin du Danube en amont de Bezdan lors de la prévision des débits d'eau pour la station de Bezdan, se fait de la manière suivante: le bassin est divisé en une grille régulière composée de 40 rectangles (4x10), au centre desquels sont interpolées les précipitations mesurées aux stations hydrométéorologiques les plus proches. On applique l'interpolation linéaire. Le poids des stations a été adopté inversement proportionnel à leur distance du centre du rectangle, mais en tenant compte de leur emplacement par rapport les uns aux autres. La détermination des champs de précipitations présentés par 40 points a été exécutée à l'aide de l'équation (10). Dans cette équation intervien-

nent deux systèmes de vecteurs propres qui correspondent à deux directions des axes des coordonnées  $Z$  (1÷4) et  $\Psi$  (1÷10).

Pour la prévision des débits caractéristiques à Bezdán on a maintenu les deux premiers coefficients de décomposition  $B_1$  et  $B_2$  sur l'axe  $Z$  et quatre coefficients de décomposition  $B_1, B_2, B_3, B_4$  sur l'axe  $\Psi$ . La forme générale de l'équation pour la formulation des prévisions de débits moyens décennaires ( $Q_{10}$ ) est présentée ci-après.

$$Q_{10} = \alpha \sum_{i=1}^6 \tau_i Q_i + \sum_{i=1}^6 C_i B_i \quad (13)$$

où

$Q_i$  - débits d'eau aux profils de jauge amont;  
 $\tau_i$  - temps de propagation de l'onde entre les profils de jauge;  
 $\alpha$  et  $C_i$  - paramètres obtenus à l'aide de la méthode d'optimisation.

Le premier membre de la partie droite (13) représente les réserves d'eau dans le lit du Danube jusqu'à Bezdán et dans le lit de son affluent Inn, tandis que le deuxième membre représente le champ des sommes de précipitations dans le bassin versant jusqu'à Bezdán pour le mois précédant le moment de la formulation de la prévision.

Dans le cas des prévisions des débits moyens décennaires, l'erreur relative de l'équation (13) pour le choix par sondage est égale à 0,52  $\sigma_k$ . L'application de cette équation donne les meilleurs résultats dans la prévision des débits maxima décennaires; notamment: 0,65  $\sigma_k$  d'après

les réserves d'eau dans le lit seulement, et 0,49 ·  $\tilde{G}_x$  d'après les réserves du lit et prenant en compte les précipitations sur la surface du bassin.

En dehors de la méthode pour la prévision des débits minima, a été élaborée pour les mêmes périodes d'échéance, la méthode de formulation des prévisions garanties pour les débits d'eau de plus grande probabilité. La méthode est fondée sur l'application de la loi de l'épuisement des réserves d'eau dans les lits des fleuves. Les courbes de l'épuisement des réserves d'eau (caractérisées par des débits  $Q_0$  au moment initial) y entrent sous forme d'exposants à indices composés

$$Q(t) = Q_0 \exp\left[-at/(bn+1)\right] + Q_f \quad (14)$$

où

$n$  - écart dans le temps, compté à partir du moment initial;  $Q_f$  - débit de base;  $a$  et  $b$  - paramètres choisis à l'aide du procédé d'optimisation.

L'influence de la répartition, au long du lit du Danube, des réserves d'eau sur leur épuisement au profil de jauge pour lequel sont formulées les prévisions de débits garantis est calculée à l'aide de la formule

$$Q_r = \sum_{i=1}^2 Q_{0,i} \int_0^t \exp\left[-a\tau_i/(b\tau_i+1)\right] P_i(t-\tau) d\tau + \sum_{i=3}^6 Q_{0,i} \int_0^t \exp(-1/\tau_i) P_i(t-\tau) d\tau, \quad (15)$$

où

$Q_r$  - débit d'eau garanti à Bezdan;  $Q_{0,i}$  - débit d'eau au moment de la formulation de la prévision au profil de jauge  $i$ ;  $P_i(\tau)$  - courbes de la propagation de l'onde depuis le profil  $i$  jusqu'au profil de jauge pour lequel la prévision est formulée.

Le contrôle de l'équation (15), effectué dans 500 cas choisis par sondage, a prouvé le haut degré de fiabilité des prévisions formulées à l'aide de ladite formule.

#### LITTERATURE

- Мухин В.М. Применение эмпирических ортогональных функций к рейсовым прогнозам минимальных уровней воды. - Труды Гидрометцентра СССР, 1968, вып.25, стр. 47-69.
- Мухин В.М. Решение некоторых обратных задач гидрологии с помощью регуляризирующих алгоритмов. - Труды Гидрометцентра СССР, 1969, вып. 55, стр.12-37.
- Мухин В.М. Прогнозы характерных уровней и расходов воды р.Дунай с заблаговременностью 10-12 суток. - Труды Гидрометцентра СССР, 1982, вып.240, стр.3-21.

#### 4.1.2 Méthodes de formulation des prévisions à courte échéance des niveaux d'eau du Danube

##### 4.1.2.1 En République Fédérale d'Allemagne

###### 1. Prévisions du niveau d'eau

Pour la voie navigable fédérale du Danube entre Kelheim et Jochenstein (km 2414,72 - 2201,77), les prévisions du niveau d'eau ne sont établies, en règle générale, que dans le cadre du service d'informations sur les hautes eaux. Les données sont communiquées lorsque les niveaux d'eau excèdent les valeurs suivantes:

|   |         |
|---|---------|
| station hydrométrique de Regensburg -<br>Eiserne Brücke | 400 cm, |
| Hofkirchen  | 450 cm, |
| Passau  | 700 cm. |

Les prévisions du niveau d'eau sont transmises

à 5,00 h pour 16,00 h,  
à 11,50 h pour 22,00 h,  
à 17,50 h pour 10,00 h du jour suivant.

Des prévisions à plus longue échéance ne sont pas établies.

Pour basses eaux et lorsque le niveau d'eau augmente en approchant du haut niveau navigable, des prévisions à courte échéance sont établies dans des cas isolés pour les besoins de la navigation.

###### 2. Prévisions du débit d'eau

Pour la voie navigable fédérale du Danube, des prévisions du débit d'eau ne sont pas établies.

### 3. Prévisions du régime des glaces

Lorsque la formation des glaces commence dans les écluses et avant-ports ou que le charriage peut être observé, le service d'informations sur le régime des glaces pour la voie navigable fédérale du Danube reprend la transmission des données.

Les informations sur le régime des glaces comportent les températures de l'air et de l'eau, les niveaux d'eau, les régimes des glaces dans les biefs de retenue et sur la section courante (actuellement: Geisling - Vilshofen), les conditions pour la navigation, la mise en exploitation de brise-glace et, le cas échéant, les prévisions pour le jour suivant.

Il n'est pas possible d'établir, à longue échéance, des prévisions des phénomènes de glaces, des développements et des travaux exécutés en vue de briser la glace.

#### 4.1.2.2 En République d'Autriche

##### a) Prévisions journalières

A Vienne et à Linz, le Service Hydrographique dispose d'un réseau de mesurage des niveaux d'eau à distance permettant la transmission courante et l'enregistrement des niveaux d'eau aux stations hydrométriques en amont sur le Danube et sur les affluents les plus importants (19 échelles à distance à Linz et 12 à Vienne). Ces services sont chargés également de la transmission régulière des informations officielles et des prévisions sur les niveaux d'eau.

Depuis la mise en service de la centrale hydro-électrique de Abwinden-Asten en juin 1979, l'échelle de Linz/Donau est mise en eau et une prévision journalière n'est donc plus possible. Le secteur autrichien du Danube de l'échelle de Achleiten/Donau (km 2223,05) jusqu'à la centrale de Melk (km 2037,86) est aménagé par des centrales et il n'y a plus de tronçon à courant libre entre les centrales. Seul un tronçon long de 30 km environ en aval de la centrale de Melk et le tronçon en aval de la centrale de Greifenstein (km 1948,88) sont encore en pente naturelle.

C'est donc uniquement le Service central de mesurage à distance à Vienne qui fournit des prévisions du niveau d'eau à l'échelle de Vienne-Reichsbrücke/Donau pour les 24 heures. On utilise à cette fin des lignes de référence de l'échelle. Pour environ la moitié des valeurs pronostiquées on constate une variation de + 10 cm des valeurs réelles. Pour ce qui est de l'autre moitié les écarts sont plus importants ce qui est dû souvent aux influences météorologiques variables à court terme.

- b) Prévisions de niveau d'eau en cas de hautes eaux. En cas de hautes eaux, les prévisions sur les débits d'eau sont établies par le Service Hydrographique pour la Haute-Autriche à Linz aux échelles de Schärding/Inn pour des délais de 3, 6 et 9 heures de débit et à l'échelle de Linz/Donau pour des délais de 6, 9 et 12 heures d'une part et d'autre part pour les niveaux d'eau à l'échelle de Ybbs/Donau pour des délais de 3 et 6 heures. Les niveaux d'eau aux échelles de Schärding/Inn et de Linz/Donau sont établis moyennant une courbe d'étalonnage.

Le modèle appliqué dans ce cas est basé sur les changements importants de débit enregistré à des stations choisies en tenant compte des durées de fonctionnement données actuellement, le secteur du fleuve étant divisé en trois systèmes partiels. Vu les différentes réactions d'écoulement, on a introduit une différenciation entre l'été et l'hiver pour les équations des prévisions basées sur les régressions multiples pour le régime de montée et de sommet. L'opération se fait sur ordinateur, mais peut aussi être exécutée ultérieurement de façon manuelle. Compte tenu des expériences faites à l'occasion des hautes eaux de 1985 et de plusieurs crues d'hiver de moindre importance on est en train de modifier actuellement le programme, c'est pourquoi il n'est pas possible de donner des indications sur les erreurs intervenues et les précisions.

En cas de hautes eaux, le Service Hydrographique de la Basse-Autriche à Vienne présente des prévisions sur le niveau d'eau pour un délai de 6 heures à l'échelle de Vienne - Reichsbrücke/Donau, le débit pronostiqué étant transformé moyennant une courbe d'étalonnage en valeur de niveau d'eau (voir 4.2.2.2 b)).

#### 4.1.2.3 En République Fédérative Tchèque et Slovaque

Voir 4.1.1.3

#### 4.1.2.4 En République de Hongrie

Voir 4.2.1.4

#### 4.1.2.5 En République Socialiste Fédérative de Yougoslavie

##### "Aperçu des méthodes de formulation des prévisions hydrologiques à courte et à longue échéance pour les besoins de la navigation sur le Danube"

##### Introduction

L'administration et la gestion rationnelles des ressources en eau ainsi que leur protection des influences nocives sont en liaison directe avec l'observation du régime des eaux et de ses changements à long et à court terme. En conformité avec le développement de l'économie nationale l'intérêt à l'égard des informations et des prévisions hydrologiques croît constamment.

Après la signature de la Convention relative au régime de la navigation sur le Danube, le Service hydrométéorologique de Yougoslavie a assumé les tâches et les obligations du rassemblement et de l'échange d'informations reçues des stations hydrologiques sur l'état des eaux du Danube et de ses affluents directs. On a entamé aussi la publication des premières prévisions pour quelques profils du Danube et de la Sava.

La navigation de plus en plus poussée sur le Danube et sur ses affluents, l'apparition plus fréquente de hauts niveaux d'eau, les mesures de protection prises pour lutter avec ces niveaux, ainsi que la construction de grands ouvrages hydrauliques exigent l'élargissement des stations hydrologiques formant le réseau d'information et du réseau des stations pour les besoins des prévisions hydrologiques.

1. Situation dans le domaine du rassemblement et de l'échange des renseignements hydrologiques fournis par les stations du réseau d'information

Le réseau d'informations hydrologiques qui existe sur le territoire de la Yougoslavie englobe 175 stations hydrologiques dont 125 stations fournissent informations aux hydrologues chaque jour, tandis que l'information hydrologique des autres 50 stations est rassemblée pendant les périodes de grandes crues seulement, quand le niveau d'eau des points respectifs dépasse "les valeurs critiques" établies. En outre, surtout pendant les périodes des hautes-eaux, respectivement des basses-eaux, des phénomènes de glaces, le service hydrométéorologique reçoit les données du réseau des stations temporaires qui fonctionnent dans le cadre d'autres organisations et entreprises.

La fréquence des observations du niveau d'eau aux stations hydrométriques est, dans la plupart des cas, de deux fois par jour; les relevés sont effectués à 6<sup>h</sup> et à 18 heures.

En période de haut niveau, le nombre d'observations à certaines stations augmente. Les observations hydrologiques obtenues sont transmises par téléphone ou par radio aux départements hydrométéorologiques des républiques/régions. Certains postes hydrologiques (environ 30) sont dotés des limnigraphes les plus modernes à guidage à distance, où le rassemblement des données est automatique.

L'échange opérationnel d'informations hydrologiques est réalisé dans le cadre du service hydrométéorologique, respectivement entre les départements hydrométéorologiques républicains et régionaux au moyen de télécommunications, dont le centre se trouve au Département Fédéral Hydrométéorologique.

En outre, dans le cadre des conventions et d'accords bilatéraux ou multilatéraux le Département Fédéral Hydrométéorologique reçoit des pays danubiens des informations et des prévisions hydrologiques.

L'ensemble des informations hydrologiques recueillies dans le cadre du service hydrométéorologique de Yougoslavie ainsi que les prévisions publiées, les informations et les avertissements sont régulièrement inclus dans les bulletins des organisations compétentes hydrologiques et diffusés à tous les intéressés dans le bassin respectif ainsi qu'aux média.

Pour satisfaire aux besoins de la navigation sur le Danube l'ensemble des informations hydrométéorologiques, traité au Département Fédéral Hydrométéorologique, est diffusé chaque jour à tous les pays danubiens et est communiqué en même temps par radio Belgrade dans le cadre de l'émission des "Bulletins des niveaux d'eau des fleuves, cours d'eau, rivières". Cette information fournit les données des 40 stations hydrométriques situées sur le Danube et sur ses affluents, ainsi que les prévisions à longue et à courte échéance des niveaux d'eau pour certaines stations hydrométriques.

## 2. Prévisions à courte échéance du niveau (débit) d'eau sur le Danube

Selon le caractère du secteur de fleuve, le

niveau de développement du système de rassemblement d'informations hydrologiques, l'heure de l'obtention des informations par le centre d'information hydrologique, ainsi que les besoins de l'hydrologie opérationnelle, on utilise différentes méthodes et pratiques pour la formulation à courte échéance des prévisions d'eau et des débits sur le Danube. Toutes les pratiques se fondent sur le fait, que les débits d'eau dans les profils du Bas Danube résultent essentiellement des processus qui se déroulent dans le réseau fluvial. Ainsi à titre conventionnel on peut mettre en relief les groupes suivants des prévisions:

1. Les prévisions de niveaux d'eau ou des débits d'eau basées sur la théorie des rapports entre niveaux (débits) d'eau;
2. Les prévisions des niveaux ou des débits d'eau basées sur les relations de corrélations multiples linéaires ou nonlinéaires;
3. Les prévisions des niveaux ou des débits d'eau basées sur les lois de l'écoulement de l'eau dans le réseau fluvial.

#### 2.1 Méthodes basées sur la théorie des rapports entre les niveaux ou débits d'eau

Ce groupe de méthodes est utilisé depuis longtemps par l'hydrologie opérationnelle. Lors de l'établissement des rapports on tient compte des valeurs correspondantes dans les profils aval et amont. Etant donné que le temps de propagation d'eau jusqu'au secteur est exprimé part -qui coïncide presque à la période, pour laquelle est élaborée la prévision - T, soit,

$$Q_{nizv,t+T} = f(Q_{uzv,t}) \quad 2.1$$

Quand le profil n'a pas de courbe du débit ou bien l'influence des affluents est très prononcée, on peut le plus souvent présenter la relation suivante:

$$H_{nizv,t} = f (H_{uzv,t-\tau_1}, H_{prit,t-\tau_2}) \quad 2.2$$

où

$\tau_1$  et  $\tau_2$  - durée de propagation de l'eau entre le profil amont (sur le cours principal et affluent) jusqu'au profil de sortie.

Utilisant ces réglementations pour tous les profils sur le Danube pour lesquels on élabore des prévisions, on a établi une relation pour la période  $T = 1$   $T = 2$ , pour laquelle est élaborée la prévision. Ceci se passe dans le cas de hausse ou bien de baisse du hydrographe.

En tant qu'exemple, dans l'Annexe N° 1 on présente cette relation pour le poste hydro-métrique de Bogojewo. Il faut dire que la relation respective a été élaborée pour tous les profils du Danube pour les cas où le niveau maximum de l'eau atteint des valeurs maxima. Cette relation prend en compte le temps nécessaire pour l'apparition d'un tel niveau sur le secteur en observation.

## 2.2 Méthodes basées sur la théorie des corrélations linéaire multiple et nonlinéaire

En utilisant la théorie de la régression linéaire multiple et tenant compte du temps de parcours entre les profils, on obtient le rapport pronosticatoire pour le jour suivant d'un secteur élémentaire, en utilisant en même temps le rapport entre les débits d'eau dans les profils aval, amont et dans le profil pour lequel la prévision est formulée, c'est-à-dire:

$$B_{t+1} - B_t = K_1 A_t + K_2 A_{t-1} + K_3 B_t + K_4 B_{t-1} + K_5 C_t \quad 2.3$$

où

$K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  - coefficients de regression qui sont la fonction du débit d'eau dans le profil B, ce qui signifie  $K_i = f(B)$ ;

B - débit d'eau pour lequel la prévision est formulée;

A, C - débit d'eau dans les profils amont et aval respectivement;

t - temps.

Par l'application du schéma donné ont été élaborées les relations pour les prévisions avec une échéance de 1 à 5 jours à différents profils respectivement du temps de propagation d'une station hydrométrique à l'autre.

Ainsi, par exemple, la relation prévisionnelle pour l'élaboration de la prévision du débit d'eau pour  $t = 1$  jour à la station hydrométrique Bezdan se présente comme suit:

$$Q_{t+1}^{Bez} = Q_t^{Bez} + K_{D1} Q_t^{Baja} + K_{D2} Q_{t-1}^{Baja} + K_{D3} Q_t^{Bez} + K_{D4} Q_{t-1}^{Bez} + K_{D5} Q_t^{Bog} \quad 2.4$$

Les valeurs des coefficients de régression  $K_{D1}$ , qui sont en fonction des débits à la station hydrométrique de Bezdan, sont présentées sur la fig. N° 2.

Dans le cas d'une grande nonlinéarité entre les prédicateurs et les prévisseurs lors de l'élaboration des relations prévisionnelles, on peut utiliser la théorie de la corrélation normalisée nonlinéaire. Dans ce cas, il faut dès le début assurer la normalisation de toutes les variables et ensuite établir l'équation de la régression linéaire entre la variable indépendante  $U_0$  (H) et les variables dépendantes  $U_j$  (H), représentées comme suit:

$$U_0 (H) = \sum_{j=1}^n \mathcal{L}_{0,j} U_j (H) \quad 2.5$$

Lors de l'établissement de la relation prévisionnelle apparaît un décalage des prédicateurs dans le temps  $\tau_{j,k}$ , d'où résulte l'équation de régression entre le prédicateur et les prévisseurs qui s'exprime sous la forme suivante:

$$\tilde{U}[H(t)] = \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^K \mathcal{L}_{0,j,k} U_{j,k} [H(t-\tau_{j,k})] \quad 2.6$$

où

$\tilde{U} [H(t)]$  - valeurs normalisées du niveau d'eau  $\tilde{H} (t)$  dans le temps  $t$ ;  $U_{j,k} [H(t-\tau_{j,k})]$  - valeurs normalisées des prédicateurs  $U_{j,k}$ , c'est-à-dire du niveau d'eau dans le temps  $t-\tau_{j,k}$ ;  
 $\mathcal{L}_{0,j,k}$  - coefficients de régression;  
 $\tau_{j,k}$  déplacement (le décalage), dans le temps à la station hydrométrique "j" et "k" - indice du décalage dans le temps.

Au cours du développement du modèle il faut

d'abord définir la relation empirique (graphique ou analytique) entre les valeurs normalisées  $U(t-\tau_j)$  et les valeurs initiales respectives des variables  $H(t-\tau_j)$ .

$$U(t-\tau_j) = U / H(t-\tau_j) // H(t-\tau_j) = f / U(t-\tau_j) // \quad 2.7$$

On entend par les paramètres optima, les paramètres obtenus auprès des conditions des profils d'entrée qui sont unis aux paramètres des prévisions à erreurs minima.

A titre d'exemple on peut dire que la relation prévisionnelle optima pour les prévisions du niveau d'eau à la station hydrométrique de Novi Sad sur le Danube, dans les conditions d'application du principe susmentionné, se présente comme suit:

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{t+2}^{N.S.} &= f / 1.41 U(H_t^{N.S.}) + 0.15 U(H_t^{Bog}) - \\ &- 0.58 U(H_{t-2}^{N.S.}) // \quad 2.8 \end{aligned}$$

Vu que la durée de propagation sur le secteur donné est variable et tenant compte du fait que dans la pratique nous utilisons les données, obtenues pour les mêmes laps de temps, des corrections courantes (journalières) sont apportées audit modèle prévisionnel.

### 2.3 Les prévisions des niveaux ou des débits d'eau basées sur l'analyse des processus dans le réseau du fleuve

En cas d'un changement prononcé de la vague des crues sur tout le parcours du fleuve, la

prévision du niveau ou du débit d'eau est élaborée par le calcul de la transformation de la vague de crue et l'application d'un nombre de modèles hydraulico-hydrologiques peu différents, c'est-à-dire des fonctions de transformation.

En tout cas le débit d'eau au profil d'arrivée peut être défini sur la base du calcul de la transformation de la courbe entrante de l'hydrogramme et de l'étendue de la vague de crue au profil entrant sur la section du fleuve principal et en tenant compte de l'afflux latéral dans le réseau fluvial:

$$Q_{nizv,t} = \int_0^t Q_{ul,t-\tau} r_{\tau} d\tau + \int_0^t q_{t-\tau} R_{\tau} d\tau \quad 2.9$$

ou bien en différences finales:

$$Q_{nizv,t} = \sum_{\tau=1}^{\tau_{max}} Q_{ul,t-\tau+1} r_{\tau} \sum_{\tau=1}^{\tau_{max}} q_{t-\tau+1} R_{\tau} \quad 2.10$$

où

$Q_{ul}$ ,  $Q_{iz}$  - débits d'eau dans les profils amont et aval du secteur;  $q_t$  - afflux latéral dans le réseau fluvial,  $r_{\tau}$ ,  $R_{\tau}$  - ordonnées de la courbe de propagation dans le lit du fleuve et de l'afflux latéral.

L'afflux latéral représente l'afflux sur le secteur de fleuve situé entre deux profils et, pour son évaluation on prend en considération les débits des petits fleuves ou les débits d'eau dans le réseau fluvial principal à l'ai-

de de l'équation du bilan d'eau, notamment:

$$q = Q_{niz} - Q_{uz} \pm \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad 2.11$$

où  $\Delta W$  - volume d'eau variable dans le réseau fluvial pendant un laps de temps donné.  $\Delta t$ .

En appliquant la méthode susmentionnée on a réussi à élaborer d'abord un modèle simulatif et ensuite le modèle de pronostic pour quelques profils du Danube. Le secteur Budapest-Bogjevo avec un afflux latéral sensible peut être considéré typique; sur ce secteur la variation du volume est présentée sous forme de fonction du débit variable et du temps de propagation sur de différents secteurs à savoir:

$$\Delta W = f (\Delta Q_{Bud}, \Delta Q_{Bez}, \Delta Q_{Bog}, \tau_{Bud-Bez}, \tau_{Bez-Bog}) \quad 2.12$$

La relation entre le temps de propagation et le débit moyen sur le secteur est définie pour tous les soussecteurs du fleuve.

Les ordonnées de la fonction de transformation  $r_{\tau}$  i  $R_{\tau}$  sont obtenues par optimisation, pour le calcul de laquelle a été utilisée la formule analytique suivante:

$$r_{\tau} = \frac{\Delta t}{\tau_{\ell} (n-1)} \left[ \frac{t}{\tau_{\ell}} \right]^{n-1} e^{-t/\tau_{\ell}} \quad 2.13$$

Dans le cadre des phases du calcul de l'optimisation d'un secteur donné ont été obtenues les valeurs des paramètres suivants:  $r_{\tau}$  (n=5;  $\tau_{\ell} = 0,95$ );  $R_{\tau}$  (n=6;  $\tau_{\ell} = 0,6$ ),

Les corrections courantes ont été apportées au modèle donné. Celles-ci se résument en l'introduction de corrections journalières dans les données d'entrée, afin que la différence entre les valeurs pronostiquées et les valeurs d'observations soit égale à "0".

Le modèle donné a été appliqué pour l'élaboration des prévisions des débits d'eau à la station hydrométrique de Bogojevo avec une échéance de  $\Delta t = 1$  à 2 jours. La prévision des niveaux d'eau est utilisée dans la relation:  $Q = f(H)$ .

En dehors des modèles susmentionnés on utilise dans la pratique opérationnelle des prévisions des niveaux d'eau (débits d'eau) sur le Danube, des modèles, représentant une variante améliorée du modèle Kalinine-Milioukov (secteur du Danube subissant l'influence de la retenue de la station hydraulique "Djerdap") ainsi que le modèle stochastique "SELF-TUNING".

Les prévisions journalières des niveaux et des débits d'eau sur le Danube sont élaborées d'après les modèles susmentionnés. Les résultats obtenus servent de base aux hydrologues-pronosticiens pour la formulation des prévisions définitives, destinées à servir les besoins des différents utilisateurs.

### 3. Prévisions à longue échéance du niveau (débit) d'eau sur le Danube

A l'heure actuelle afin d'élaborer les prévisions hydrologiques à longue échéance pour le Danube on utilise des modèles basés sur la relation empirique du débit d'eau en fonction des réserves d'eau dans le réseau du lit au moment de la formulation des prévisions.

Ainsi, par exemple, pour la prévision du débit moyen pour un grand laps de temps  $Q_{i+t}$  on utilise sa relation empirique en fonction du volume d'eau dans le réseau du lit au moment de la formulation de la prévision.

$$\bar{Q}_{i+t} = f(W_i) \quad 3.1$$

Dans la plupart des cas, cette relation prévisionnelle n'est pas suffisamment directe car la valeur du débit d'eau dans le profil aval est fonction aussi bien du volume d'eau initial dans le réseau du lit, que de l'apport d'eau dans le réseau du lit dans la période qui suit la prévision.

La relation empirique est établie en conséquence tant pour la montée que pour la baisse des crues printanières où l'on tient compte de la somme totale des précipitations. Dans certains cas, l'influence des apports d'eau supplémentaires a été solutionnée par la construction de la relation empirique:

$$\bar{Q}_{i+t} = \alpha W_i + \beta q_i \quad 3.2$$

où  $q_i$  - apport d'eau journalier dans le réseau du lit;

$\alpha$  - coefficient angulaire de la ligne directe contournante la plus basse sur le graphique de la relation  $Q_{i+t} = f(W_i)$ ;

$\beta$  - le coefficient angulaire de la ligne moyenne de la relation  $\bar{Q}_{i+t} = \alpha W_i + \beta q_i$ .

Pour la prévision de la crue maximum printanière on utilise la relation suivante:

$$Q_{\max} = f(W_i) \quad H_{\max} = f(W_i), \quad 3.3$$

la prévision étant publiée pour le jour où la valeur de l'apport dans le réseau du lit est maximale.

En outre, pour les prévisions des niveaux et des débits d'eau (maxima, moyens, minima) sur le Danube on utilise dans la pratique opérationnelle des modèles élaborés selon la théorie de l'analyse componentielle et la théorie de l'optimisation (Moukhine, 1982).

Pour augmenter l'exactitude des prévisions publiées, on introduit dans le modèle respectif les corrections courantes de prévisions, pour éviter les erreurs des prévisions précédentes. Une telle approche s'est avérée utile et les prévisions publiées avec une échéance de 10-15 jours pour le Danube peuvent être considérées satisfaisantes.

#### 4. Prévisions du régime des glaces

Dans la pratique opérationnelle pour les prévisions des phénomènes de glaces sur le Danube on applique les relations physico-statistiques entre la somme totale des valeurs de la transmission de chaleur (ou bien de son index), qui est nécessaire pour l'apparition de la glace et les facteurs qui les conditionnent.

En qualité d'index de la transmission de chaleur sommaire est utilisée la somme des valeurs négatives de la température de l'air.

Pour la prévision à courte échéance de l'apparition de la glace on utilise les relations du type:

$$\sum \theta_- = f(V_0) \quad \sum \theta_- = f(V_0, H) \quad 4.1$$

où  $\sum \Theta_-$  - la somme de la température négative moyenne de l'air, nécessaire pour l'apparition d'un phénomène de glace;  $V_0H$  - la température de l'eau, le niveau de l'eau le jour d'avant le moment où la température de l'air était 0°C.

De telles relations ont été obtenues pour le Danube en tenant compte des données initiales de toutes les stations hydrométriques. Grâce à cela, il est possible de définir la somme minimale des températures négatives de l'air, nécessaire au début des phénomènes de glaces sur le secteur ou sur le profil respectifs.

Le dessin N° 3 présente en tant qu'exemple une telle relation pour la station hydrométrique de Bezdán.

Le modèle pour la prévision d'une prise du fleuve est lui-aussi basé sur la relation physico-statistique, c'est-à-dire empirique, consistant notamment en la définition de la somme minimale des températures négatives de l'air nécessaires pour le commencement de la prise du fleuve ainsi qu'en la définition de la température critique de l'air. En réalité il est nécessaire de composer le graphique de la relation entre la somme des températures négatives de l'air pour la période commençant du jour d'apparition de la glace jusqu'au commencement de la prise du fleuve, et le débit ou le niveau d'eau le jour de l'apparition de la glace. Néanmoins, pour l'élaboration des prévisions de l'apparition de la glace, et respectivement de la prise du fleuve il s'est avéré insuffisant de prendre en compte seulement la somme des températures négatives, étant donné que la prise du fleuve a lieu seulement à condition que les températures moyennes journa-

lières soient plus basses qu'une température critique quelconque -  $\Theta_{kr}$ . La température critique dépend aussi du débit et du niveau d'eau. Les relations présentées plus haut prennent dans une telle situation la forme suivante:

$$(\sum \Theta_-)_{\min} = f(H_{pl}) \quad \Theta_{kr} = f(H_{pl}) \quad 4.2$$

où  $\sum \Theta_{- \min}$  - la somme minimale des températures moyennes négatives journalières nécessaire au commencement de la prise du fleuve,  $H_{pl}$  - le niveau d'eau la précédant.

Le dessin N° 4 présente en tant qu'exemple les relations établies entre  $(\sum \Theta_-)$  nécessaire à la prise de glace sur le Danube à la station hydrométrique de Bezdán et a) la température critique de l'air  $\Theta_{kr}$ ; b) le niveau de l'eau le jour de l'apparition de la glace flottante.

La relation empirique pour la prévision de la rupture des glaces sur le Danube a été élaborée sur des principes presque identiques.

Afin de réaliser le contrôle des prévisions hydrologiques publiées, c'est-à-dire de contrôler l'efficacité des modèles hydrologiques, utilisés dans la pratique opérationnelle, on effectue régulièrement l'évaluation de l'exactitude des prévisions. Dans ce but, parallèlement aux critères graphiques on utilise aussi d'autres critères objectifs, basés sur la relation entre l'erreur de la prévision et les changements prévus par la variable pendant la période d'échéance de la prévision.

Fig. 1 - Relation des niveaux correspondants

$$H_{t+1}^{\text{bogojevo}} = f(H_t^{\text{bezdan}}, H_t^{\text{d.miholjac}})$$

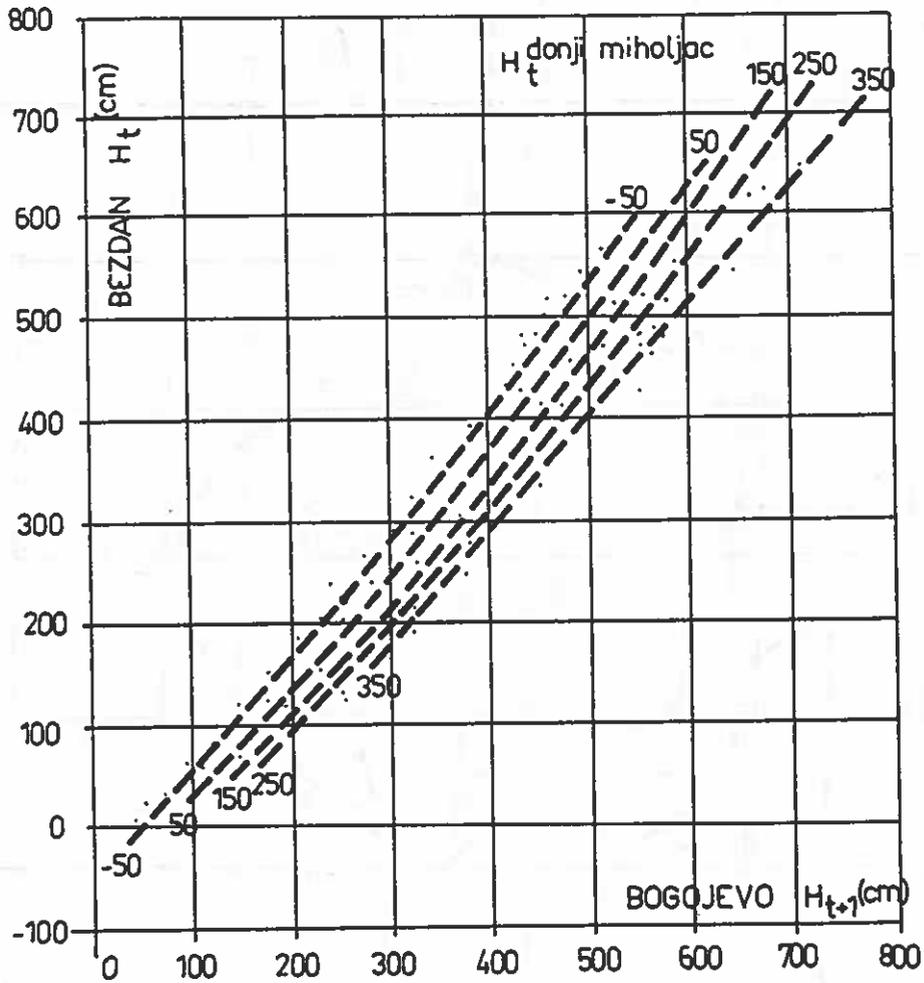


Fig. 2 - Relation  $K_{Di} = f(Q_{Bez.})$

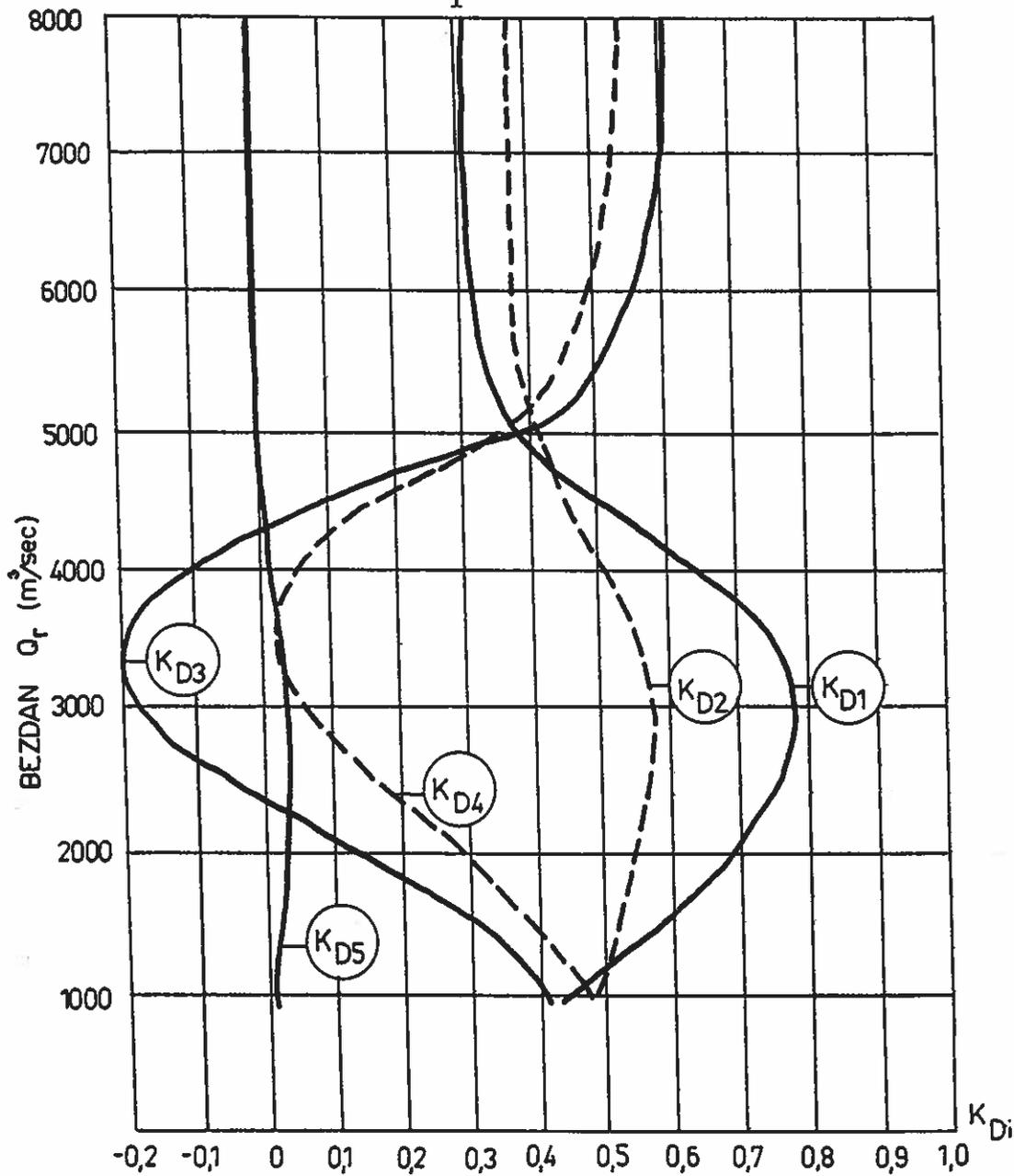


Fig. 3 - Relation entre  $(\Sigma \ominus)_{\min}$  nécessaire à l'apparition de la glace flottante sur le Danube auprès de la ville de Bezdan, la température et le niveau de l'eau

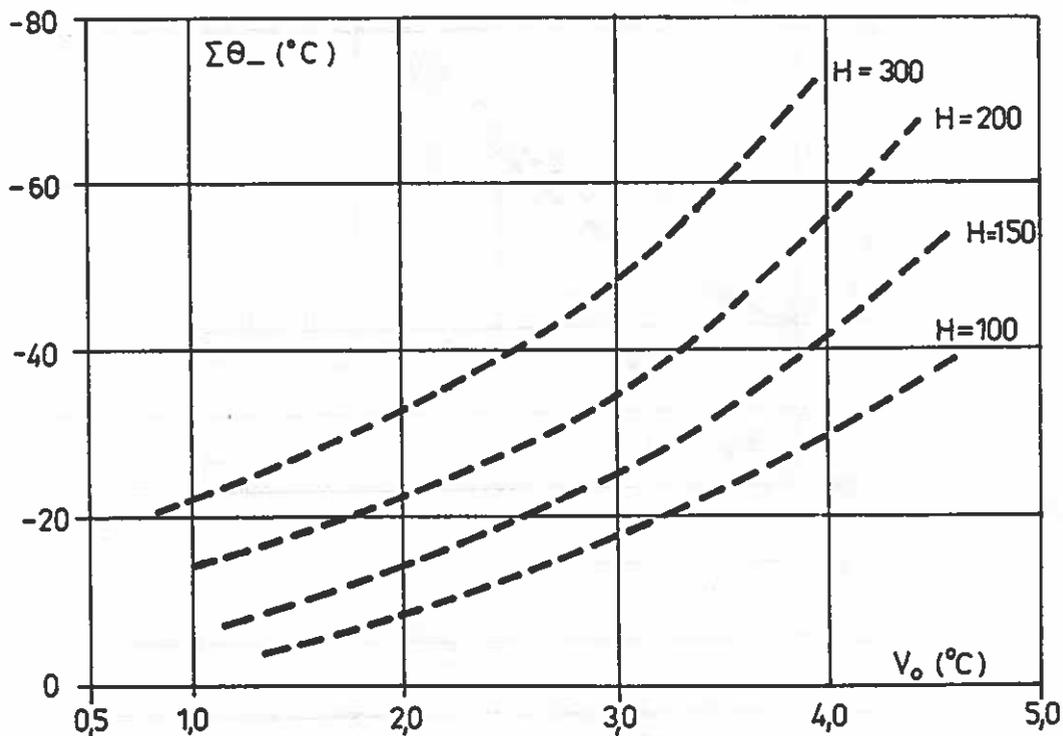
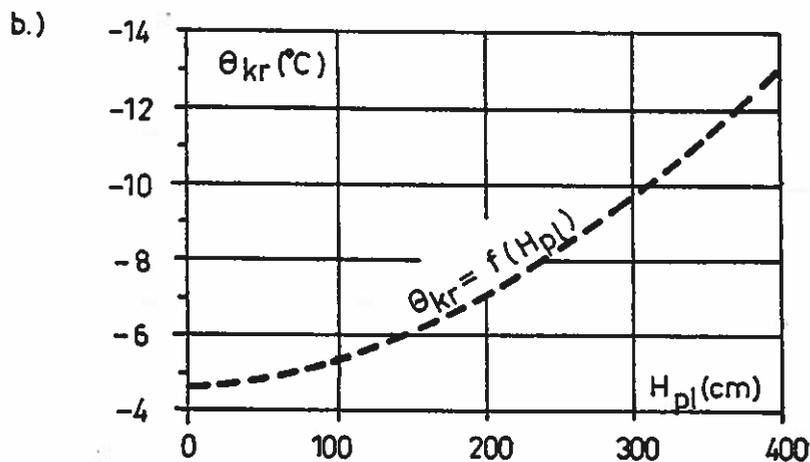
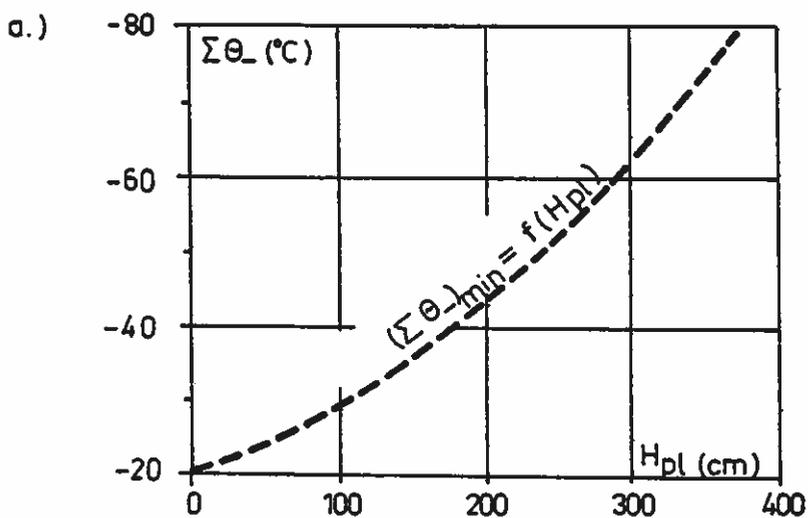


Fig. 4 - Relation entre  $(\Sigma \Theta_-)_{\min}$  nécessaire à la prise de glace sur le Danube auprès du point hydrométrique de Bezdan et:

a) température critique de l'air  $\Theta_{kr}$ ;

b) niveau de l'eau le jour de l'apparition de la glace flottante



#### 4.1.2.6 En République de Bulgarie

##### Information concernant les méthodes d'élaboration des prévisions hydrologiques à courte échéance du niveau d'eau du Danube pour les besoins de la navigation

Les prévisions hydrologiques opératives portant sur un intervalle de 48 heures pour les besoins de la navigation sur le secteur commun roumano-bulgare du Danube sont publiées chaque jour par la Direction de l'entretien de la voie navigable - Roussé pour les stations hydrométriques de Roussé (km 495,600) et Silistra (km 375,500). Les mêmes stations publient chaque semaine des prévisions hydrologiques hebdomadaires des hauts et bas niveaux à attendre

La prévision du niveau de l'eau est particulièrement difficile étant donné l'absence d'une information suffisante et opérative sur le régime d'activité du SHEN "Portes de Fer" I et II. Son influence sur le degré de variabilité du niveau est dominante lors d'un faible afflux d'eau dans le secteur commun bulgaro-roumain du fleuve, fait qui peut être constaté d'une façon plus précise auprès de la station hydrométrique de Novo Selo (km 833,600).

Les variations journalières du niveau de l'eau sont particulièrement défavorables pour la navigation durant les périodes des basses eaux, étant donné qu'il y a des cas où la différence entre les niveaux enregistrés le matin à 8 heures et le niveau moyen journalier a dépassé 50-60 cm. Ces variations ne peuvent pas être incluses dans la détermination des différences journalières du niveau de l'eau et de cette façon elles créent les prémisses pour l'apparition d'erreurs dans la prévision du niveau du fleuve.

Prévision du niveau d'eau portant sur l'intervalle de deux journées à la station hydrométrique de Roussé (km 495,600)

Afin d'élaborer des prévisions de deux jours du niveau du fleuve auprès de la station hydrométrique de Roussé on a trouvé les relations linéaires entre les différences journalières du niveau d'eau enregistrées auprès des stations hydrométriques de Novo Selo (km 833,600) Lom (km 743,300) Oriahovo (km 678,000) Svistov (km 554,300) et Roussé (km 495,600).

Pour trouver la relation linéaire par l'entremise de la méthode des moindres carrés l'on utilise les niveaux d'eau de la période du 1er janvier 1988 jusqu'au 31 août 1990.

L'utilisation des données correspondant à une période plus longue ne mène pas à de meilleurs résultats étant donné la circonstance qu'une période plus longue est liée à une influence nettement défavorable du régime d'activité des centrales hydrauliques sur le régime du niveau d'eau des secteurs bas.

Description de la méthode

On trouve en utilisant la méthode des moindres carrés, les différentes relations linéaires entre les niveaux d'eau à Novo Selo, pour la seconde journée (intervalle de 24 heures) et à Oriakhovo pour la première journée (intervalle de 24 heures).

Pour les premières 24 heures la relation est la suivante, où les coefficients "a" ont les valeurs du tableau:

| H       | a(0)   | a(1)  | a(2)  |
|---------|--------|-------|-------|
| 600     | 0,024  | 0,328 | 0,657 |
| 400-599 | -0,402 | 0,462 | 0,461 |
| 200-399 | 0,125  | 0,436 | 0,565 |
| 199     | -0,388 | 0,432 | 0,538 |

Pour le second intervalle de 24 heures la relation est la suivante:

| H       | B(0)   | B(1)  | B(2)   | B(3)  |
|---------|--------|-------|--------|-------|
| 700     | 0,203  | 0,199 | 0,240  | 0,973 |
| 500-699 | -1,272 | 0,292 | -0,197 | 0,633 |
| 300-499 | 0,204  | 0,224 | -0,026 | 0,519 |
| 299     | -0,311 | 0,186 | 0,094  | 0,444 |

où:

- la prévision de la différence journalière (24 heures) du niveau d'eau du jour respectif à Roussé;
- la différence journalière (24 heures) à Novo Selo le jour de la publication de la prévision;
- le même pour Lom;
- le même pour Oriahovo;
- le même pour Svistov;
- le niveau d'eau à Oriahovo le jour de la prévision;
- le même pour Novo Selo.

Prévision du niveau d'eau du Danube, portant sur l'intervalle de deux jours à la station de Silistra (km 375,500)

On a trouvé dans ce cas la relation linéaire entre les différences journalières (24 h) du niveau d'eau aux stations d'Oriahovo (km 678,000) Svistov (km 554,300) Roussé (km 495,600) et Silistra (km 375,500). On a utilisé aussi les données du niveau d'eau pour la période du 1 janvier 1988 au 31 août 1990.

Pour les premières 24 heures la relation est la suivante:

| H       | a(0)   | a(1)   | a(2)  |
|---------|--------|--------|-------|
| 600     | -0,348 | 0,083  | 0,716 |
| 400-599 | 0,120  | 0,152  | 0,629 |
| 200-399 | -0,114 | 0,221  | 0,599 |
| 199     | 0,689  | -0,205 | 0,968 |

Pour le deuxième intervalle de 24 heures la relation est la suivante:

| H       | b(0)   | b(1)  | b(2)   | b(3)  |
|---------|--------|-------|--------|-------|
| 600     | 0,593  | 0,293 | -0,055 | 0,551 |
| 400-599 | -0,545 | 0,494 | -0,303 | 0,603 |
| 200-399 | -0,039 | 0,390 | 0,057  | 0,366 |
| 199     | -0,114 | 0,332 | 0,347  | 0,165 |

#### 4.1.2.7 En Roumanie

Voir 4.2.1.7 et 4.2.2.7

#### 4.1.2.8 En Union des Républiques Socialistes Soviétiques

Voir 4.1.1.8

## 4.2 Prévision du débit d'eau

### 4.2.1 Méthodes de formulation des prévisions à longue échéance des débits d'eau du Danube

#### 4.2.1.1 En République Fédérale d'Allemagne

Voir 4.1.2.1

#### 4.2.1.2 En République d'Autriche

Voir 4.1.1.2

#### 4.2.1.3 En République Fédérative Tchèque et Slovaque

Voir 4.1.1.3

#### 4.2.1.4 En République de Hongrie

"Prévision à longue échéance de l'écoulement printanier sur le Danube et la Tisza" - Service d'Etat des prévisions hydrologiques. Centre de recherches scientifiques hydrauliques (VITUKI) Budapest

La prévision est fondée sur les regressions des relations linéaires de deux, trois ou quatre variables entre la quantité des réserves en neige à la fin de l'hiver (HVT) ou la quantité de ce qu'on appelle les réserves potentielles de la neige (POT), c'est-à-dire la quantité de la réserve de la neige déterminée en fonction de l'altitude du bassin versant et de l'écoulement au cours d'une période donnée (L) ou du niveau d'eau maximum (H). Par la suite c'est la quantité des précipitations au cours d'une période donnée (C) et la somme des températures positives (T), qui figurent comme variables.

Les relations établies sont fondées sur les données de l'écoulement au cours des mois printaniers, les données des niveaux maxima, des réserves de neige, mesurées entre le 1er mars et le 1er avril, les réserves potentielles de la neige, les précipitations et les sommes des températures d'air positives pour la période 1965-1982 dans les profils Danube-Bratislava, Danube-Budapest, Tisza-Szeged (par suite de l'absence d'un nombre de données suffisant sur les réserves de neige dans le profil Tisza-Szeged, on a fait appel aux données couvrant la période 1967-1982). Les valeurs mensuelles et les sommes en période printanière (III-IV-V; III-IV; IV-V) ont été établies.

Les équations de régressions linéaires de 4, 3 ou 2 variables pour toutes les variantes possibles (pour certains mois, sommes mensuelles) ont été analysées. L'objectif de cette analyse était de choisir les relations prévisionnelles selon lesquelles, dans des conditions données, on obtient les meilleurs résultats et pour cette raison ont été calculés les écarts entre les valeurs effectives et les valeurs calculées de l'écoulement (niveau d'eau maximum) obtenues par des relations prévisionnelles de 4, 3 ou 2 variables au cours des mois printaniers de la période 1965-1982. Afin de trouver les meilleures relations prévisionnelles, c'est-à-dire les relations résultant de l'écart minimum du volume mensuel de l'écoulement (ou des niveaux d'eau maxima), ont été étudiées les séries de calcul obtenues d'après les relations à partir des valeurs les plus simples jusqu'aux valeurs les plus complexes des réserves potentielles de neige, des précipitations et des sommes de température positive.

Un examen détaillé des écarts entre les données effectives et les données calculées figure ci-après. Les erreurs du calcul des valeurs des éléments hydrologiques au cours de la période 1965-1982, ainsi que les valeurs moyennes, les écarts moyens quadratiques des erreurs, la moyenne arithmétique absolue et les écarts maxima positifs et négatifs (calculés en km<sup>3</sup> et en m) ont été établis.

Grâce à l'analyse de la série des erreurs de certains schémas prévisionnels, on a pu établir les équations prévisionnelles les meilleures du volume de l'écoulement printanier et des niveaux d'eau maxima, c'est-à-dire les équations qui s'expriment par les écarts quadratiques minima, les erreurs moyennes et les intervalles entre les erreurs.

Au cours de l'analyse ont été choisies les équations prévisionnelles de la regression linéaire de 2 et de 4 variables pour établir l'écoulement printanier et les niveaux d'eau maxima sur le Danube et la Tisza avec un nombre de données de base maxima et minima. Le total des informations (le recueil maxima des données de base) indique la disponibilité de renseignements sur le volume des réserves de neige vers la fin de l'hiver (du 1er mars au 1er avril), ainsi que des sommes des précipitations et des températures d'air positives attendues. Quand le volume d'informations est insuffisant, c'est que l'on dispose seulement des données sur le volume des réserves de la neige et dans les équations prévisionnelles figurent, en tant que sommes prévues de précipitation et sommes de la température, leur valeurs moyennes pluriannuelles.

Les équations prévisionnelles du volume de l'écoulement printanier (L) et des niveaux

d'eau maxima (H) pour les profils de Bratislava et de Budapest dans le bassin versant du Danube et pour le profil de Szeged dans le bassin de la Tisza s'expriment comme suit:

$$\begin{aligned}
 L & , \quad H = a + b \text{ HVT} + c \text{ POT}_{0-1500}^+ \\
 & + d \text{ POT}_{0-1000} + e \text{ POT}_{500-2000} + f \text{ POT}_{1000-2000}^+ \\
 & + g \text{ POT}_{1500-2000} + h C_{\text{III}} + h C_{\text{III}} + i T_{\text{III}} + \\
 & + j C_{\text{IV}} + k T_{\text{V}} + l C_{\text{III+IV}} + m T_{\text{III+IV}} + \\
 & + n C_{\text{V}} + o T_{\text{V}} + p C_{\text{III+IV+V}} + q T_{\text{III+IV+V}} + \\
 & + r C_{\text{IV-V}} + s T_{\text{IV+V}}
 \end{aligned}$$

où L = volume de l'écoulement printanier (km<sup>3</sup>)

H = niveau d'eau maximum;

HVT = volume total des réserves de neige dans le bassin versant au 1er mars ou au 1er avril (km<sup>3</sup>):

POT<sub>h<sub>1</sub>-h<sub>2</sub></sub> = réserve de neige le 1er mars dans la zone d'altitude h<sub>1</sub> à h<sub>2</sub> (km<sup>3</sup>);

H<sub>1</sub>, h<sub>2</sub> = limite de la zone d'altitude (m. au-dessus du niveau de la mer);

C<sub>t</sub> = somme des précipitations prévue pour les mois indiqués t (mm);

t = III, IV, V - mars, avril, mai;

T<sub>t</sub> = sommes des températures positives au cours d'un mois (des mois) t (degré, jour);

a b c ..... s = constantes.

Les valeurs détaillées des constantes (paramètres de régression) ainsi que les écarts moyens quadratiques de certains éléments hydrologiques, leurs valeurs moyennes pluriannuelles et leurs anomalies, ainsi que leur pourcentage par rapport à la moyenne pluriannuelle figurent dans les équations prévisionnelles de l'écoulement printanier et des niveaux d'eau maxima aux fins de publication des prévisions au 1er mars et au 1er avril pour les profils de Bratislava et Budapest (Danube) et Szeged (Tisza) des tableaux de l'ouvrage mentionné (Hirling, 1984).

Les tableaux présentent également les équations pour la formulation des prévisions de l'écoulement printanier et des niveaux maxima au 1er mars et au 1er avril dans les profils principaux (Bratislava, Budapest, Szeged) sur le Danube et la Tisza quand le volume des données disponibles est maximum et minimum.

Les prévisions les plus fiables de l'écoulement printanier et des niveaux d'eau maxima en période de crue ont été obtenues quand, en dehors des valeurs de la réserve de neige on dispose également de valeurs pronostiquées fiables des précipitations et de la température de l'air au cours du printemps.

Pour le territoire de la Hongrie et les territoires environnants, c'est-à-dire pour le bassin de la Tisza, les prévisions à longue échéance mensuelles et saisonnières publiées par le service météorologique hongrois et le Centre hydrométéorologique de l'URSS sont disponibles; théoriquement ces prévisions offrent les données de base requises pour la publication des prévisions hydrologiques. Toutefois, la vérification des prévisions à longue échéan-

ce indique que dans les 20% des cas seulement on obtient en même temps de bonnes prévisions des deux éléments météorologiques.

Etant donné l'absence de prévisions météorologiques à longue échéance pour le secteur supérieur du bassin du Danube sur le territoire de la Bavière et de l'Autriche, on publie pour les profils de Bratislava et de Budapest seulement des prévisions fondées sur les équations pour lesquelles un volume de données minima est disponible ou bien indiquant les valeurs pluriannuelles des éléments météorologiques.

Les relations prévisionnelles sont fondées sur des courtes séries d'éléments hydrométéorologiques et pour cette raison il convient de souligner qu'au fur et à mesure du recueil de nouvelles informations il serait indiqué d'essayer de préciser les relations existantes.

#### Publication

Hirling Gy.:

Tavasszal várható lefolyási viszonyok hosszuidjü eléréjelzése. Vizügyi Közlemények 1984/4.

#### 4.2.1.5 En République Socialiste Fédérative de Yougoslavie

Voir 4.1.2.5

#### 4.2.1.6 En République de Bulgarie

Voir 4.1.2.6

#### 4.2.1.7 En Roumanie

"Méthodes de prévision à longue échéance des débits moyens pour le Danube" (C-tin Mociornița, V.Al. Stanescu, Ana Noda, Viorica Lupu), Institut de Météorologie et Hydrologie Bucarest, Roumanie.

Le débit moyen est un des paramètres hydrologiques qu'il faut prévoir pour un intervalle plus grand tel que la semaine, la décade ou le mois. Dans cet ouvrage on a tenté l'élaboration de deux méthodes faciles, rapides et acceptables du point de vue de la certitude, de prévision du débit moyen mensuel pour le Danube sur son secteur d'entrée sur le territoire roumain, aux Portes de Fer.

La première méthode repose principalement sur la prévision météo pour le mois prévisionné, méthode considérée correcte au moins du point de vue qualitatif et sur la loi de l'épuisement de l'eau du bassin. Ainsi, la prévision météo devra indiquer, au moins, le caractère général portant sur les précipitations (fort sec, sec, normal, pluvieux, fort pluvieux) et sur les températures des bassins versants, chose considérée possible actuellement. Ce dernier aspect des températures est particulièrement intéressant pour les mois d'hiver - printemps quand on met aussi l'accent sur la connaissance des données concernant la couche de neige et les possibilités de sa fonte.

En ce qui concerne la loi de diminution de la réserve d'eau du bassin, elle est caractérisée par la richesse d'eau de cette réserve considérée du point de vue global et exprimée par le débit moyen du mois précédent et par la valeur du débit considéré comme point de départ pour la courbe d'épuisement, respectivement par le débit moyen journalier du dernier jour du mois antérieur ou du premier jour du mois pour lequel on élabore la prévision.

Partant de ces considérations on a réalisé à la station hydrométrique Orsova, sur le Danube, où on dispose de données directes depuis 1838,

des corrélations pour chaque mois, entre les débits moyens journaliers du dernier jour d'un mois (en ordonnée) et les débits moyens mensuels du mois suivant (en abscisse). Ces corrélations ont été réalisées pour diverses phases de débit moyen mensuel enregistré durant le mois antérieur. Les corrélations graphiques reposent sur la distribution des points dans le champ pour le cas de mois fort pluvieux, pluvieux, normal, sec et fort sec.

Dans la figure No. 1 on présente ces corrélations réalisées pour le mois d'août dans la situation des débits moyens pour le mois de juillet, étendus entre 4501-5500 m<sup>3</sup>/s.

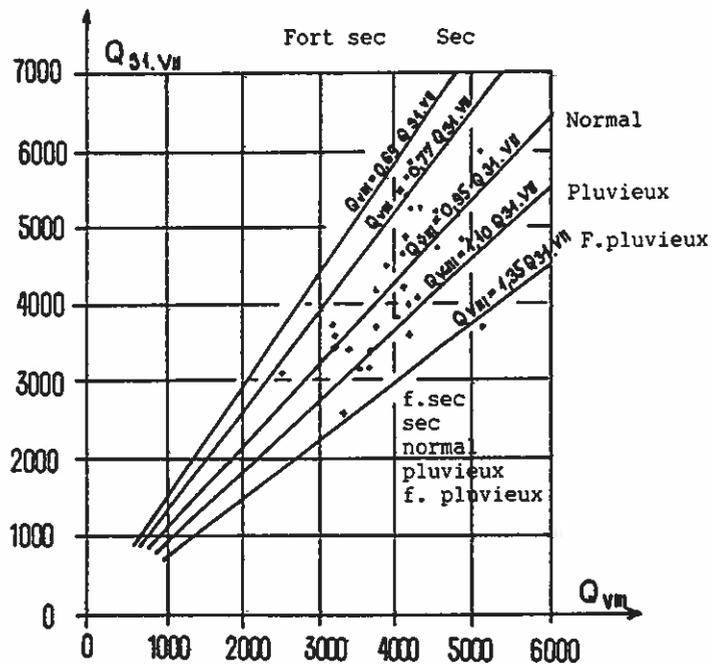


Fig. No. 1 - Les relations pour la prévision du débit moyen du mois d'août pour la situation des débits moyens du mois de juillet étendus entre 4501-5500 m<sup>3</sup>/s

Pour faciliter les calculs, toutes ces relations ont été tracées sous forme de droites qui passent par l'origine. On fait la précision que la moindre valeur de débit considérée a été de  $1300 \text{ m}^3/\text{s}$  le 28.02.1958.

La période de temps très longue dont on a disposé à la station hydrométrique Orsova et les valeurs assez sûres des débits qu'on a eu à la disposition offrent un degré acceptable de certitude à ces corrélations. Suite à l'analyse des distributions des points appartenant aux dernières 15-20 années quand on a eu d'utilisations plus importantes dans le bassin il faut mentionner qu'on peut s'en apercevoir d'une influence quelconque sur les relations établies.

Il faut souligner le fait que pour les mois d'hiver-printemps, comme on l'a mentionné, on doit réaliser une analyse plus détaillée de l'épaisseur de la couche de neige, des possibilités de sa fonte en fonction des températures prévues et du possible afflux provenant des précipitations liquides éventuelles, pour avoir la possibilité d'établir quel régime pluviométrique devrait avoir le mois respectif.

Dans le tableau No. 1 on retrouve les valeurs des coefficients de regression des équations, établies pour chaque mois, et aussi les indications concernant la qualité plus faible de certaines liaisons corrélatives, dépendente du nombre des points, qui se sont constitués en point de départ pour l'établissement de ces relations. Ainsi, pour les marches de débit moyen mensuel (du mois antérieur) pour lesquelles ce nombre est plus réduit que deux, les relations ont été établies compte tenu

aussi des points appartenant aux marches adjacentes.

Une indication générale portant sur la statistique des mois normaux, secs et pluvieux aurait pu être illustrée par un graphique qu'on n'a pas tracé quand même pour éviter l'augmentation de l'ouvrage.

Partant de la présentation déjà faite, il résulte que le degré de certitude de la prévision se trouve en directe corrélation avec le degré de précision de la prévision météo, c'est-à-dire si la prévision météo ne se réalise pas on ne peut plus parler de la réalisation de la prévision hydro, donc d'un jugement impartial de la valabilité de la méthode.

Pour une meilleure exemplification dans le tableau No. 2 on retrouve les valeurs des débits moyens mensuels calculées en 1986 (année qu'on n'a pas prise en considération quant on a calculé les relations) et celles prévisionnées en prenant comme point de départ la prévision météo et la situation météo réalisée.

Il faut mentionner que n'ayant pas à la disposition les données météo réalisées, la situation météo réalisée a été caractérisée compte tenu de la variation des débits moyens mensuels multiannuels et de la variation des débits par rapport au mois antérieur. Caractériser les mois comme secs, normaux, pluvieux, etc. sur la base des données météo enregistrées - par comparaison aux valeurs multiannuelles - pour les stations représentatives du bassin supérieur et moyen du Danube, pourrait sans doute conduire à des caractérisations plus objectives mais on considère que les critères adoptés éliminent les conclusions fausses.

On observe les erreurs relativement réduites au cas de la considération des valeurs réalisées par rapport à ceux prévues sur la base de la situation météo réalisée ( $\pm 10\%$ ) et les erreurs beaucoup plus grandes si on prend en considération les débits moyens mensuels prévus sur la base de la prévision météo ( $+ 40\%$ ) qui pour des raisons objectives a été moins exacte dans quelques mois. En grand, considérant les situations extrêmes de prévision météo pour un mois fort sec au lieu d'un mois fort pluvieux les valeurs par rapport à la situation réalisée peuvent différer de plus de 100%, mais comme on a mentionné, des situations pareilles ne peuvent être prises en considération pour le jugement de la méthode qui repose sur l'hypothèse des prévisions météo réalisées.

Cette méthode a été utilisée dans l'ouvrage d'une manière strictement locale, mais elle peut être utilisée à n'importe quelle station hydrométrique possédant des données à longue échéance, aussi bien que pour d'autres périodes de temps telles que la semaine, la décade, etc. En tout cas l'utilisation de la méthode pour des périodes de temps plus courtes peut conduire à une amélioration visible de la prévision, compte tenu des possibilités agrandies de certitude de la prévision météo et de la possibilité d'utilisation des enregistrements hydrométriques en amont de la station étudiée.

Une deuxième méthode qu'on pourrait appliquer consiste dans l'utilisation des courbes de probabilité des débits moyens mensuels dépendants des valeurs données du débit journalier du début du mois.

La méthode réside en ce qui suit:

On considère le débit moyen mensuel  $Q$  qui englobe deux composantes:

$$Q = Q^* + Q_s \quad (1)$$

où  $Q^*$  représente le débit moyen mensuel dans l'hypothèse où dans le bassin du Danube n'intervient pas au cours d'un mois aucun afflux d'eau pluviale et/ou un afflux provenant de la neige

$Q_s$  représente le volume d'eau pénétré dans le lit dans un intervalle d'un mois suite à l'afflux d'eau pluviale ou provenant de la neige.

$$\bar{Q}^* = \frac{Q_0}{\mathcal{L}} (1 - e^{-\mathcal{L}T}) \quad (2)$$

où  $Q_0$ -représente le débit moyen journalier du début du mois;

$T$  -représente la durée en jours du mois considéré;

$\mathcal{L}$ -représente le coefficient de la relation exponentielle qui exprime l'épuisement du stock d'eau de bassin  $Q(t)$ :

$$Q(t) = Q_0 e^{-\mathcal{L}t} \quad (3)$$

Il est certain que pour un mois donné, le débit moyen  $\bar{Q}$  est dépendant de  $Q_0$  ainsi que de  $Q_s$ . De plus, le débit formé par l'afflux pluvial et/ou provenant de la neige,  $Q_s$ , ne peut être prévu que dans des termes qualitatifs, à savoir:

- durant la période de fonte de la neige,  $Q_s$  est dépendant du stock d'eau provenant de la neige accumulée dans le bassin, de la température du mois en discussion (qui indique la quantité procentuelle du stock total de neige

qui fondra et pénétrera le réseau hydrographique), du degré d'humidité du sol, ainsi que des pluies tombées durant cette période.

- durant la période juillet- novembre  $Q_s$  est dépendant des quantités de pluie enregistrées et de l'humidité du sol.

C'est facile à déduire que, étant donné la complexité de la manière d'alimentation de son réseau hydrographique la modélisation déterministe des processus mentionnés n'est pas possible. Par conséquent l'apport fourni par les neiges et/ou l'apport pluvial est considéré en tant qu'élément aléatoire de type "bruit" qui se superpose conformément à la relation (1) sur le débit moyen  $Q^*$  fourni par la fonction d'épuisement (2) des réserves d'eau existantes au début du mois, et qui est dépendante de  $Q_0$ .

Par conséquent, la variable  $\bar{Q}$  est considérée aléatoire étant soumise à une distribution statistique de probabilité. Comme elle se trouve en corrélation avec la variable  $Q_0$  on peut tracer une courbe de probabilité conditionnée par n'importe quelle autre valeur possible  $Q_0$ .

Considérant les distributions unidimensionnelles des débits  $\bar{Q}$  et  $\bar{Q}_0$  de type Galton (log-normales) on détermine les paramètres de la courbe de probabilité conditionnée, de manière:

$$\bar{x}_y = \bar{x} + \rho_{xy} \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (y - \bar{y}) \quad (4)$$

$$\sigma_{x/y} = \sigma_x \sqrt{1 - \rho_{xy}^2} \quad (5)$$

où:

$\bar{x}_y$  représente la moyenne de la ligne log  $\bar{Q}$  conditionnée par la valeur  $y = \log Q_0$  choisie

de manière arbitraire;  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$  représentent les moyennes arithmétiques des variables  $x = \log \bar{Q}$  et  $y = \log Q_0$ ;  $\bar{\sigma}_x$  et  $\bar{\sigma}_y$  représentent les écarts quadratiques moyens de ces variables.

$\rho_{xy}$  représente le coefficient de corrélation entre  $x$  et  $y$ ;

$\bar{\sigma}_{x/y}$  représente l'écart quadratique moyen de la variable  $x$  conditionné par une valeur  $y$  donnée.

Connaissant la moyenne et l'écart quadratique, c'est-à-dire  $\bar{x}_y$  et  $\bar{\sigma}_{x/y}$  de la courbe de probabilité conditionnée, on peut calculer ces courbes en employant les tableaux usuels d'intégration de la distribution normale.

Dans les figures No. 2 et 3 on retrouve un exemple de courbes de probabilité conditionnée de dépassement pour les mois d'avril et d'octobre.

Dans le tableau No. 3 on retrouve les valeurs des paramètres des courbes de probabilité conditionnée des relations (4) et (5) pour chaque mois de l'année.

Fig. No. 2 - Les courbes de probabilité conditionnée pour le mois d'avril

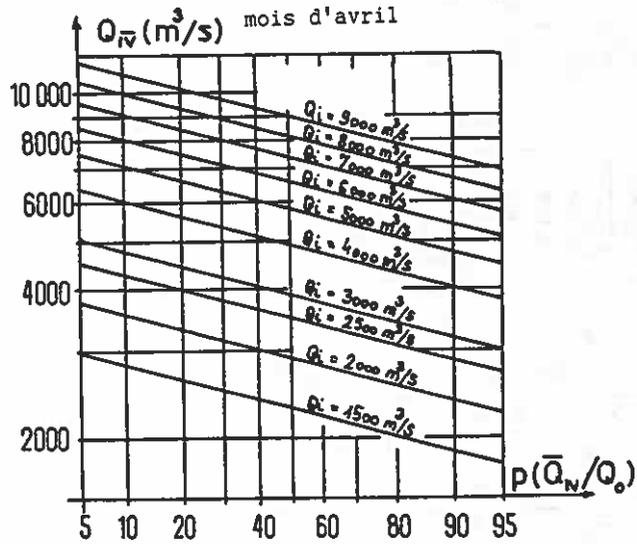


Fig. No. 3 - Les courbes de probabilité conditionnée pour le mois d'octobre

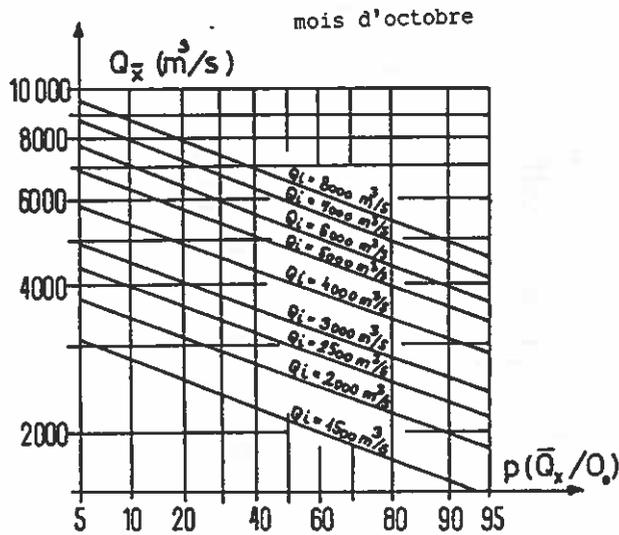


Tableau 3

| M O I S     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | I     | II    | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | XI    | XII   |
| $\bar{X}$   | 3,62  | 3,66  | 3,79  | 3,87  | 3,87  | 3,81  | 3,73  | 3,63  | 3,58  | 3,58  | 3,65  | 3,66  |
| $\bar{Y}$   | 3,62  | 3,61  | 3,70  | 2,84  | 3,88  | 3,85  | 3,78  | 3,66  | 3,60  | 3,55  | 3,60  | 3,67  |
| $\sigma_x$  | 0,188 | 0,161 | 0,13  | 0,126 | 0,116 | 0,110 | 0,114 | 0,119 | 0,128 | 0,145 | 0,162 | 0,169 |
| $\sigma_y$  | 0,215 | 0,200 | 0,191 | 0,137 | 0,127 | 0,128 | 0,116 | 0,130 | 0,134 | 0,159 | 0,175 | 0,182 |
| $\rho_{xy}$ | 0,68  | 0,68  | 0,72  | 0,83  | 0,89  | 0,87  | 0,85  | 0,84  | 0,78  | 0,74  | 0,82  | 0,72  |

Une telle courbe est utilisée de la manière suivante:

1. Connaissant le débit initial  $Q_0$  on choisit la courbe de probabilité parallèle aux courbes données pour des valeurs standard  $Q_0$  (par ex.: 1.500, 2.000, 2.500, 3.000 m<sup>3</sup>/s, etc.)
2. En partant de l'information prognostique météorologique on choisit la probabilité de dépassement d'une valeur de  $\bar{Q}$ .

Dans la situation des mois où l'alimentation provenant de la neige est considérable (III-V) pour des réserves importantes d'eau de neige au début de sa fonte corroborées avec une prévision météorologique qui indique des températures dépassant les valeurs normales et des pluies excédentaires, on choisit la probabilité étendue entre 10%-20%.

Autrement, pour des réserves de neige peu importantes et surtout en cas de prévision d'un mois froid à précipitations surtout sous forme de neige, la probabilité choisie se situera entre 80% et 90%.

Par exemple, pour la prévision du débit moyen du mois d'avril on dispose des données prognostiques suivantes:

- Le bassin est tout couvert de neige au début du mois.
- La prévision indique des températures moyennes au dessus de celles normales et des précipitations normales.
- Le débit journalier le 31 mars est  $Q_0 = 6\ 250\ m^3/s$

Dans ces conditions on choisira  $p(\bar{Q}/Q_0)=20\%$  et il en résulte, conformément à la figure 2

$$\bar{Q} = 7700 \text{ m}^3/\text{s},$$

Pour les mois à alimentation dominante pluviale, la probabilité étendue entre 20-40% indiquera une prévision météorologique d'un régime pluvieux excédentaire et la probabilité étendue entre 60-80% une période déficitaire.

C'est évident que pour toute autre combinaison prognostique des précipitations et températures et tenant compte de leur distribution spatiale sur le bassin du Danube (zone supérieure ou moyenne) on choisira des valeurs de la probabilité conditionnée conformément aux influences déterministes de celles-ci.

Le choix de ces probabilités dépend du degré d'expérience de l'hydrologue prognosticien et évidemment de l'utilisation de cette méthode pour une période plus longue.

Tableau No. 1

Coefficients de régression des équations utilisées pour la  
prévision des débits moyens mensuels pour le Danube sur le  
secteur d'entrée sur le territoire roumain

| No. | Mois<br>pré-<br>sionné | Le débit moyen<br>pour le mois<br>antérieur | La prévision météo pour le mois prévisionné |       |        |          |                  |
|-----|------------------------|---|---|-------|--------|----------|------------------|
|     |                        |   | fort<br>sec                                 | sec   | normal | pluvieux | fort<br>pluvieux |
| 1   | 2                      | 3   | 4   | 5     | 6      | 7        | 8                |
| 1.  | I                      | 1.800-2.500                                 | 0,62*                                       | 0,77* | 0,98*  | 1,46*    | 2,12*            |
| 2.  |                        | 2.501-3.000                                 | 0,62*                                       | 0,77  | 0,98   | 1,46     | 2,12**           |
| 3.  |                        | 3.001-3.600                                 | 0,62*                                       | 0,77* | 0,98*  | 1,46*    | 2,12.*           |
| 4.  |                        | 3.601-4.500                                 | 0,57*                                       | 0,77  | 0,98   | 1,30     | 2,12*            |
| 5.  |                        | 4.501-5.550                                 | 0,57*                                       | 0,75* | 0,93   | 1,25     | 1,70             |
| 6.  |                        | 5.501-6.500                                 | 0,57*                                       | 0,75  | 0,93   | 1,25     | 1,70*            |
| 7.  |                        | 6.501-8.000                                 | 0,50*                                       | 0,70  | 0,83   | 1,16     | 1,53*            |
| 8.  |                        | 8.001-10.000                                | 0,50*                                       | 0,70* | 0,83*  | 1,16*    | 1,53*            |
| 9.  | II                     | 1.800-2.500                                 | 0,77*                                       | 1,02  | 1,42   | 1,83     | 2,76*            |
| 10. |                        | 2.501-3.000                                 | 0,77*                                       | 1,02* | 1,42*  | 1,83*    | 2,76*            |
| 11. |                        | 3.001-3.600                                 | 0,62  | 0,85  | 1,12   | 1,53     | 2,70*            |
| 12. |                        | 3.601-4.500                                 | 0,62*                                       | 0,85  | 1,12   | 1,53     | 2,63*            |
| 13. |                        | 4.501-5.550                                 | 0,62*                                       | 0,85  | 1,02   | 1,37     | 2,08*            |
| 14. |                        | 5.501-6.500                                 | 0,62*                                       | 0,82  | 1,02   | 1,37     | 2,08*            |
| 15. |                        | 6.501-8.000                                 | 0,57*                                       | 0,70* | 0,90*  | 1,06*    | 1,28*            |
| 16. |                        | 8.001-10.000                                | 0,57*                                       | 0,70* | 0,90   | 1,06*    | 1,28*            |
| 17. | III                    | 1.800-2.500                                 | 0,83*                                       | 1,18  | 1,63   | 2,38     | 3,11*            |
| 18. |                        | 2.501-3.000                                 | 0,83*                                       | 1,18* | 1,63*  | 2,38*    | 3,11*            |
| 19. |                        | 3.001-3.600                                 | 0,83*                                       | 1,10  | 1,35   | 1,75     | 2,50*            |

| 1   | 2    | 3             | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|-----|------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20. |      | 3.601-4.500   | 0.77* | 0.97  | 1.20  | 1.55  | 2.50* |
| 21. |      | 4.501-5.500   | 0.77* | 0.97  | 1.20  | 1.55  | 2.50* |
| 22. |      | 5.501-6.500   | 0.77* | 0.90  | 1.07  | 1.32  | 1.80  |
| 23. |      | 6.501-8.000   | 0.75* | 0.90  | 1.03  | 1.20  | 1.43  |
| 24. | IV   | 3.001-3.600   | 0.70* | 0.90* | 1.09* | 1.33* | 1.60* |
| 25. |      | 3.601-4.500   | 0.70* | 0.90* | 1.09* | 1.33* | 1.60* |
| 26. |      | 4.501-5.500   | 0.70* | 0.90  | 1.09  | 1.33  | 1.53  |
| 27. |      | 5.501-6.500   | 0.70  | 0.90  | 1.08  | 1.21  | 1.46  |
| 28. |      | 6.501-8.000   | 0.70  | 0.90  | 1.08  | 1.18  | 1.38  |
| 29. |      | 8.001-10.000  | 0.70  | 0.90  | 1.08  | 1.18  | 1.38  |
| 30. | V    | 3.000-4.500   | 0.80  | 0.90  | 1.00  | 1.25  | 1.40  |
| 31. |      | 4.501-5.500   | 0.80  | 0.90  | 1.00  | 1.16  | 1.40  |
| 32. |      | 5.501-6.500   | 0.75  | 0.90  | 0.98  | 1.14  | 1.40  |
| 33. |      | 6.501-8.000   | 0.75  | 0.90  | 0.98  | 1.12  | 1.28  |
| 34. |      | 8.001-10.000  | 0.71  | 0.81  | 0.92  | 1.06  | 1.25  |
| 35. |      | 10.001-13.700 | 0.71* | 0.79  | 0.86  | 0.92  | 1.02* |
| 36. | VI   | 3.000-4.500   | 0.80* | 0.90* | 1.03  | 1.18* | 1.40* |
| 37. |      | 4.501-5.500   | 0.80* | 0.90* | 1.02* | 1.15* | 1.33* |
| 38. |      | 5.501-6.500   | 0.72* | 0.82  | 0.95  | 1.10  | 1.26* |
| 39. |      | 6.501-8.000   | 0.72* | 0.32  | 0.92  | 1.04  | 1.21  |
| 40. |      | 8.001-10.000  | 0.68  | 0.77  | 0.86  | 0.98  | 1.21  |
| 41. |      | 10.001-13.300 | 0.68* | 0.77  | 0.84  | 0.92  | 1.05* |
| 42. | VII  | 3.000-3.600   | 0.80* | 0.90* | 0.97* | 1.11* | 1.27* |
| 43. |      | 3.601-4.500   | 9.80* | 0.90* | 0.97* | 1.11  | 1.27* |
| 44. |      | 4.501-5.500   | 0.65  | 0.80  | 0.94  | 1.08  | 1.27  |
| 45. |      | 5.501-6.500   | 0.65  | 0.75  | 0.85  | 0.95  | 1.11* |
| 46. |      | 6.501-8.000   | 0.65  | 0.75  | 0.85  | 0.95  | 1.10* |
| 47. |      | 8.001-10.000  | 0.62  | 0.71  | 0.80  | 0.90  | 1.07  |
| 48. |      | 10.001-13.700 | 0.62* | 0.70* | 0.80* | 0.87* | 0.95* |
| 49. | VIII | 3.000-3.600   | 0.69* | 0.82* | 0.95  | 1.10  | 1.35* |
| 50. |      | 3.601-4.500   | 0.69* | 0.82  | 0.95  | 1.10  | 1.35  |

| 1   | 2   | 3            | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|-----|-----|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 51. |     | 4.501-5.500  | 0.69  | 0.77  | 0.95  | 1.10  | 1.35  |
| 52. |     | 5.501-6.500  | 0.64* | 0.76  | 0.86  | 1.00  | 1.25  |
| 53. |     | 6.501-8.000  | 0.64* | 0.77  | 0.85  | 0.99  | 1.16* |
| 54. |     | 8.001-10.000 | 0.56* | 0.69  | 0.84  | 0.97  | 1.10* |
| 55. | IX  | 2.501-3.000  | 0.67* | 0.83* | 0.99* | 1.10* | 1.33* |
| 56. |     | 3.001-3.600  | 0.67* | 0.83  | 0.99  | 1.16  | 1.34* |
| 57. |     | 3.601-4.500  | 0.64  | 0.80  | 0.95  | 1.14  | 1.41  |
| 58. |     | 4.501-5.500  | 0.64  | 0.80  | 0.95  | 1.08  | 1.41  |
| 59. |     | 5.501-6.500  | 0.64* | 0.80  | 0.95  | 1.21  | 1.41  |
| 60. | X   | 1.800-2.500  | 0.81* | 1.03* | 1.22* | 1.50* | 1.90* |
| 61. |     | 2.501-3.000  | 0.81  | 1.03  | 1.22  | 1.59  | 1.80  |
| 62. |     | 3.301-3.600  | 0.68  | 0.85  | 1.10  | 1.38  | 1.83  |
| 63. |     | 3.601-4.500  | 0.65  | 0.82  | 1.03  | 1.25  | 1.57  |
| 64. |     | 4.501-5.500  | 0.65  | 0.78  | 0.95  | 1.08  | 1.40* |
| 65. |     | 5.501-6.500  | 0.63  | 0.75  | 0.90  | 1.05  | 1.40* |
| 66. |     | 1.506-3.000  | 0.65* | 0.75* | 0.90* | 1.05* | 1.40* |
| 67. | XI  | 2.000-2.500  | 0.78* | 1.03  | 1.25  | 1.62  | 2.02* |
| 68. |     | 2.501-3.000  | 0.78* | 0.95  | 1.15  | 1.39  | 1.75* |
| 69. |     | 3.001-3.600  | 0.78* | 0.95  | 1.15  | 1.39  | 1.73  |
| 70. |     | 3.601-4.500  | 0.75  | 0.93  | 1.14  | 1.35  | 1.70  |
| 71. |     | 4.501-5.500  | 0.68  | 0.36  | 1.06  | 1.30  | 1.70  |
| 72. |     | 5.501-6.500  | 0.68* | 0.85  | 1.06  | 1.30  | 1.70  |
| 73. |     | 6.501-8.000  | 0.68* | 0.85* | 1.06* | 1.30* | 1.70* |
| 74. | XII | 1.800-2.500  | 0.75* | 0.93* | 1.08* | 1.29* | 1.77* |
| 75. |     | 2.501-3.000  | 0.75  | 0.93  | 1.08  | 1.29  | 1.77  |
| 76. |     | 3.001-3.600  | 0.75  | 0.93  | 1.08  | 1.29  | 1.75  |
| 77. |     | 3.001-4.500  | 0.66  | 0.86  | 1.07  | 1.29  | 1.75  |
| 78. |     | 4.501-5.500  | 0.66  | 0.82  | 0.95  | 1.10  | 1.30  |
| 79. |     | 5.501-6.500  | 0.66  | 0.80  | 0.93  | 1.10  | 1.30  |
| 80. |     | 6.501-8.000  | 0.65* | 0.80  | 0.92  | 1.10  | 1.30* |
| 81. |     | 8.001-10.000 | 0.57* | 0.63  | 0.75  | 0.88  | 1.02  |

- Observations: - La notation \*) représente la qualité informative de la notation
- Le débit moyen mensuel du mois prévisionné ( $Q_0$ ) est calculé à l'aide de l'équation:

$$Q_0 = KQ_i$$

où:

$Q_i$  représente le débit moyen journalier réalisé dans le dernier jour du mois antérieur, K-représente le coefficient de régression adopté pour la marche du débit moyen réalisé dans le mois antérieur et la situation de prévision météo pour le mois étudié

Tableau No. 2.

| No. | Mois      | Q départ<br>m <sup>3</sup> /s | Q moyen<br>du mois<br>anté-<br>rieur | Prévision<br>météo | Prévision<br>hydro<br>m <sup>3</sup> /s | Situation<br>météo<br>réalisée | Prévision<br>hydro<br>pour la<br>situation<br>météo<br>réelle<br>m <sup>3</sup> /s | Le débit<br>moyen<br>réalisé<br>m <sup>3</sup> /s | Erreur<br>par rap-<br>port à<br>la si-<br>tuation<br>météo<br>prévi-<br>sionnée<br>% | Erreur<br>par rap-<br>port à<br>la si-<br>tuation<br>météo<br>prévi-<br>sionnée<br>% |
|-----|-----------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------|---|--------------------------------|--|---|--|--|
| 1   | Janvier   | 4500                          | 4300                                 | sec                | 3470                                    | pluvieux                       | 5850   | 5700  | 39   | -3   |
| 2   | Février   | 7700                          | 5700                                 | normal             | 7850                                    | sec                            | 6310   | 6100  | -29  | -3   |
| 3   | Mars      | 6400                          | 6100                                 | normal             | 6850                                    | normal                         | 6850   | 7100  | 4  | 4  |
| 4   | Avril     | 9300                          | 7100                                 | normal             | 10050                                   | normal                         | 10050  | 9100  | -10  | -10  |
| 5   | Mai       | 8550                          | 9100                                 | normal             | 7870                                    | sec                            | 6930   | 7200  | -9   | 4  |
| 6   | Juin      | 6050                          | 7200                                 | sec                | 4960                                    | pluvieux                       | 6290   | 6900  | 28   | 9  |
| 7   | Juillet   | 6450                          | 6900                                 | normal             | 5480                                    | sec                            | 4840   | 5150  | -6   | 6  |
| 8   | Août      | 4550                          | 5150                                 | normal             | 4320                                    | sec                            | 3500   | 3200  | -35  | -9   |
| 9   | Septembre | 3100                          | 3200                                 | normal             | 3070                                    | normal                         | 3070   | 3100  | 1  | 1  |
| 10  | Octobre   | 2650                          | 3100                                 | normal             | 2570                                    | sec                            | 2250   | 2200  | -17  | -2   |
| 11  | Novembre  | 2950                          | 2200                                 | sec<br>normal      | 4230                                    | sec                            | 3040   | 3000  | -41  | -1   |
| 12  | Décembre  | 2500                          | 3000                                 | pluvieux<br>normal | 2700                                    | sec                            | 2330   | 2600  | -4   | 10   |

#### 4.2.1.8 En Union des Républiques Socialistes Soviétiques

Voir 4.1.1.8

#### 4.2.2 Méthodes de formulation des prévisions à courte échéance des débits d'eau du Danube

##### 4.2.2.1 En République Fédérale d'Allemagne

Voir 4.1.2.1

##### 4.2.2.2 En République d'Autriche

###### a) Prévisions journalières du débit d'eau

Les prévisions sur les niveaux d'eau décrites sous le point 4.1.2.2 a) pour l'échelle de Wien (Reichsbrücke)/Donau peuvent chaque fois être transformées en débits moyennant une courbe d'étalonnage en tenant compte cependant de façon appropriée du Canal du Danube et du Nouveau Danube.

###### b) Prévisions du débit d'eau en cas de hautes eaux

Le Service Hydrographique pour la Haute-Autriche à Linz établit des prévisions, en partie sur les débits (Schärding/Inn, Linz/Donau) et en partie pour les niveaux d'eau (Ybbs/Donau) (voir 4.1.2.2.b).

Le Service Hydrographique pour la Basse-Autriche à Vienne utilise un modèle du réservoir à multiples cascades pour lequel un modèle ARIMA fait fonction de correcteurs. Ce modèle permet d'établir des prévisions des débits d'eau de 6 heures à l'échelle de Wien (Reichsbrücke)/Donau. En raison de la construction de la centrale hydro-électri-

que de Greifenstein, des adaptations et jaugeages de ce modèle sont devenus nécessaires ce qui fait que pour le moment il n'est pas possible de donner des indications sur les erreurs ni des précisions.

#### 4.2.2.3 En République Fédérative Tchèque et Slovaque

Voir 4.1.1.3

#### 4.2.2.4 En République de Hongrie

Voir p. 4.2.1.4

#### 4.2.2.5 En République Socialiste Fédérative de Yougoslavie

Voir 4.1.2.5

#### 4.2.2.6 En République de Bulgarie

Voir p. 4.1.1.6

#### 4.2.2.7 En Roumanie

"La procédure opérationnelle "Danubius Amont" pour la prévision des débits du Danube sur le secteur d'entrée dans le lac de retenue Portes de Fer I" (Dr.ing. Viorel Al. Stanescu, Valentina Ungureanu, Ing. Ciprian Corbus, Institut de Météorologie et Hydrologie Bucarest, Roumanie)

##### Résumé

La procédure opérationnelle de prévision proposée - Danubius Amont - permet l'élaboration journalière avec une anticipation de 1-7 jours de la prévision des débits du Danube sur le secteur d'admission dans le lac Portes de Fer I.

Cette procédure englobe deux modèles de propagation de type fonction linéaire de transfert, une méthode de réactualisation des débits propagés et une série de méthodes opératives de prévision afin de déterminer les vecteurs de débits prévisionnés pour 7 jours dans les sections prédictives qui constituent des entrées dans le modèle de transmission.

Les expériences effectuées ont démontré que par la procédure qu'on propose, on obtient de bons résultats dans le cas de son application en temps réel, particulièrement pour les premiers 5 jours de prévision.

### Avant-propos

Pour réaliser une exploitation optimale des Systèmes hydroénergétiques et de Navigation de Portes de Fer I et II, ainsi que pour l'élaboration quotidienne, à une anticipation de 1-7 jours, de la prévision des niveaux et des débits du Danube sur le secteur roumain en aval, il faut qu'on sache chaque jour, avec la même anticipation, quels sont les débits d'entrée dans le lac Portes de Fer I.

Dans ce but, on doit déterminer tout d'abord les débits prévus pour le même intervalle de temps pour une série de stations prédictives situées sur le Danube et sur ses affluents. Puis, ces vecteurs de débits prévus sont transmis successivement sur des secteurs du Danube et de ses affluents Drava, Tisa, Sava, Timis, Morava et Nera à l'aide d'un modèle mathématique de type fonction linéaire de transfert, en obtenant ainsi le vecteur des débits prévus pour 7 jours sur le secteur d'entrée dans le lac des Portes de Fer I, dans le noeud schématique Pancevo. Cette hypothèse de schéma-

tisation repose sur le fait que les débits d'entrée dans le lac Portes de Fer I représentent la somme des débits entrés dans son extrémité amont ainsi que sur son contour.

### 1. Le système informationnel actuel de mesure, transmission et stockage des données hydrométéorologiques

La surveillance de l'évolution météorologique et hydrologique et l'élaboration de la prévision hydrologique sont réalisées en partant des données fournies par:

- 79 stations hydrométriques du bassin supérieur et moyen du Danube;
- 56 stations hydrométriques sur le Danube et sur ses principaux affluents du bassin supérieur et moyen;
- les stations du réseau hydrométéorologique national des bassins des rivières affluentes à la Tisza et à sa zone hydrographique - Banat.

### 2. Le modèle de calcul de la transmission des débits sur le Danube

#### 2.1 L'algorithme du modèle

On utilise pour la transmission des débits sur des secteurs caractéristiques de la rivière, un modèle linéaire qui repose sur l'application de la théorie des systèmes pour l'étude du processus de transmission 1.

#### 2.2 Le calibrage du modèle de transmission

Etant donné la structure du réseau hydrographique du Danube et de ses principaux affluents on a réalisé un schéma de composition des crues -

modélisation topologique - conformément à laquelle la transmission du hydrographe des débits se réalise successivement d'un secteur à l'autre pour le Danube aussi bien que pour ses affluents. Pour chaque secteur (fig. No.1) on mentionne la longueur L (km) et à côté de chaque noeud principal se retrouve marquée la superficie du bassin versant afférent F (km<sup>2</sup>).

L'intervalle de temps à débits journaliers 1980-1987 ainsi que 1970, 1972 et 1975, années où l'on a enregistré aussi des crues remarquables sur le Danube et/ou ses affluents, a été choisi en tant que période de temps représentative utilisée pour le calibrage.

Pour déterminer les paramètres optima  $x$  et  $k$  du modèle de transmission, on a utilisé le programme de calcul PROPAG, qui appelle un fichier qui englobe les hydrographes annuels (débits annuels) pour la période de calibrage aux 16 stations hydrométriques à savoir: Budapest, Mohács, Bezdan, Bogojevo et Pančevo sur le Danube, Donji Miholjac sur la Drava, Szeged et Santa sur la Tisza, Brod et Mitrovica sur la Sava, Doboij sur la Bosna, Zvornik sur la Drina, Sag sur le Timiș, Ljubičevski Most sur la Velika Morava, Naidas sur la Nera.

### 3. La méthode de réactualisation des débits transmis

Pour l'utilisation en temps réel du modèle de diffusion il faut élaborer une méthode de réactualisation qui, reposant sur les erreurs enregistrées entre les débits simulés et ceux enregistrés au moment antérieur à l'élaboration de la prévision à la station hydrométrique d'aval, puisse opérer une correction des débits simulés durant tout l'intervalle de prévision.

La méthode de réactualisation utilisée est appliquée d'une manière différente pour la branche d'accroissement et celle de décroissement du hydrographe simulé à la station hydrométrique aval 1.

#### 4. La détermination des vecteurs des débits prévus pour 7 jours au cadre des sections prédictives

Les calculs de prévision sont effectués comptant sur les suivantes sections prédictives: Budapest sur le Danube, Donji Miholjac sur la Drava, Szeged sur la Tisza, Brod sur la Sava, Doboj sur la Bosna, Zvornik sur la Drina, Sag sur le Timiș, Ljubičevski Most sur la Velika Morava et Naidas sur le Nera (fig 1.).

Aux stations prédictives susmentionnées la prévision à anticipation de 7 jours se réalise à partir des méthodes suivantes:

##### 4.1 La méthode du gradient de soustraction (Méthode de la tendance)

Les débits enregistrés dans l'intervalle de prévision sont obtenus en retranchant chaque jour du débit enregistré au jour de l'élaboration de la prévision la valeur du gradient de soustraction  $\Delta Q$  donnée par la relation:

$$\Delta Q = \frac{Q^A}{B} + C \quad (1)$$

Dans le tableau N° 1 on retrouve les valeurs des paramètres A, B et C résultant des corrélations faites à toutes les stations prédictives.

#### 4.2 La méthode de la regression linéaire multidimensionnelle

La relation générale de prévision du débit  $Q^{(A)}$  pour une section A à anticipation  $\Delta t$  est:

$$Q_{t+\Delta t}^{(A)} = K_A \cdot Q_t^{(A)} + \sum_{i=1}^m K_i Q_t^{(i)} + C \quad (2)$$

où  $m$  représente le nombre total de sections situées sur la rivière principale et sur les affluents;  $Q^{(i)}$  représente les débits aux sections  $i$ ;  $K_A$  et  $K_i$  représentent les coefficients de regression;  $C$  représente le terme libre;  $t$  représente le moment de l'élaboration de la prévision.

Dans le tableau N° 2 on retrouve les valeurs de ces coefficients.

#### 4.3 La méthode de la fonction de transfert

Cette méthode est utilisée pour la prévision des débits à la station hydrométrique prédictoire de Budapest -  $Q^{(Bud)}$  - utilisant les débits de la station hydrométrique de Bratislava -  $Q^{(Brt)}$  à savoir:

$$Q_{t+\Delta t}^{(Bud)} = \sum_{\mu=1}^n Q_{t+\Delta t-\mu}^{(Brt)} \cdot r(\mu) \quad (3)$$

où  $\Delta t$  représente la durée moyenne des débits entre Bratislava et Budapest;  $t$  représente le moment de l'élaboration de la prévision;  $n$  représente le nombre total d'ordonnées pour un intervalle d'un jour et le nombre de la fonction de transfert de type Poisson -  $r(\mu)$  - donnée par la relation 2:

$$r(u) = \frac{u^{n-1}}{(n-1)} e^{-u} \quad (4)$$

Ne tenant compte que des débits  $Q_t^{(Brt)}$ ,  $Q_{t-1}^{(Brt)}$ ,  $Q_{t-2}^{(Brt)}$  et  $Q_{t-3}^{(Brt)}$  on adopte la suivante relation, simplifiée, de prévision

$$Q_{t+2}^{(Bud)} = 1,36 \sum_{u=2}^5 Q_{t+2-u}^{(Brt)} \cdot r(u) \quad (5)$$

#### 4.4 La méthode volumétrique

Dans le cas de certaines sections se trouvant sur les affluents plus petits, tels que: Doboï sur la Bosna, Zvornik sur la Drina, Sag sur le Timiș, Ljubičevski Most sur la Velika Morava et Naidas sur la Nera on peut prévoir les ondes de crue en partant de la quantité des précipitations enregistrée et/ou prévue.

L'algorithme de calcul est le suivant:

- on détermine la pluie moyenne sur le bassin (h) à partir des informations pluviométriques existantes et/ou des précipitations prévues et on choisit un coefficient d'écoulement ( $\mathcal{L}$ ).
- on détermine le débit maximal en utilisant la relation volumétrique:

$$Q_{max} = \frac{\bar{h} \cdot \mathcal{L} \cdot F}{T_T \cdot \gamma} \quad (6)$$

où F représente la superficie du bassin versant,  $T_T$  représente la durée totale moyenne du hydrographe;  $\gamma$  représente le coefficient de forme de la crue qu'on choisit entre 0,28-0,33,

les valeurs plus petites se rapportant à des pluies à des intensités plus grandes;

On détermine le débit moyen écoulé chaque jour par la multiplication du débit maximal avec l'ordonnée procentuelle qui correspond au jour respectif (le tableau No 3) et par l'addition du débit de base existant au moment de la production de la crue.

\*

\*

\*

La procédure de prévision DANUBIUS AMONT a été simulée pour les intervalles 25 mars - 1 juillet 1987 et 23 mars - 1 mai 1988, considérés comme représentatifs pour la raison qu'ils englobent des crues remarquables (jusqu'à 12.400 m<sup>3</sup>/s à Pancevo) pour la réalisation desquelles le bassin a contribué entièrement ou partiellement. Les résultats obtenus sont bons ne dépassant pas des erreurs de +5% pour une anticipation de 1 et de 2 jours ou de + 10% pour une anticipation de 3-5 jours, que dans 20% des cas. Pour une anticipation de 6-7 jours, les erreurs sont plus grandes surtout dans les cas des crues importantes sur la Sava et la Morava.

Dans la figure No 2 on retrouve les hydrographes enregistrés et ceux prévisionnés sur le secteur d'entrée dans le lac de Portes de Fer I pour les anticipations de 3 et 5 jours pour l'intervalle 23.03-1.07.1987.

Les valeurs des paramètres de la relation du gradient de sous-traction

Tableau No. 1

| Rivière                | Danube    | Drava          | Tisza  | Sava  | Bosna | Drina   | Morava           |
|------------------------|-----------|----------------|--------|-------|-------|---------|------------------|
| Station hydro-métrique | Buda-pest | Donji Miholjac | Szeged | Brod  | Doboj | Svornik | Ljubičevski Most |
| A                      | 1,91      | 1,00           | 1,00   | 1,00  | 1,00  | 1,47    | 1,63             |
| B                      | 42,85     | 1,11           | 20,00  | 16,00 | 8,20  | 363,00  | 1,15             |
| C                      | 0         | 88,00          | 10,00  | 10,00 | 10,00 | 0       | 0                |

Valeurs des coefficients de la regression multidimensionnelle

Tableau N° 2

| Rivière | Station hydrométrique prédictrice | Stations hydrométriques  |                   |                   |                   |                   |                  | C                 | $\Delta t$<br>jours |       |
|---------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|---------------------|-------|
|         |                                   | $K_A$ ou $K_{i,i} = 1,6$ | $K_1$             | $K_2$             | $K_3$             | $K_4$             | $K_5$            |                   |                     | $K_6$ |
| Tisza   | Szeged                            | $\frac{SZ}{0,69}$        | $\frac{SO}{0,31}$ | $\frac{AR}{0,19}$ | $\frac{SL}{0,59}$ | $\frac{OR}{0,59}$ | $\frac{Z}{0,59}$ | $\frac{CC}{0,59}$ | 26                  | 2     |
| Sava    | Brod                              | $\frac{BR}{0,71}$        | $\frac{ZG}{0,44}$ | $\frac{BN}{0,61}$ |                   |                   |                  |                   | 9                   | 2     |
| Morava  | Ljubičevski Most                  |                          |                   | $\frac{CU}{}$     |                   |                   |                  |                   | 30                  | 1     |
| Drava   | Donji Miholjac                    |                          | $\frac{VZ}{0,77}$ | $\frac{GR}{0,81}$ |                   |                   |                  |                   | 100                 | 4     |
| Timiș   | Sag*                              |                          | $\frac{LG}{1,0}$  | $\frac{BT}{2,2}$  |                   |                   |                  |                   | -200                | 2     |

Symboles des stations utilisées:

SZ (Szeged), SO (Szolnok), AR (Arad),  
SL (Salard), OR (Oradea), Z (Zerind),  
CC (Chisineu Cris), BR (Brođ) ZG (Zagreb),  
BN (Bosanski Novi), CU (Cuprija),  
VZ (Varazdin, GR (Gornja Radgona),  
LG (Lugoj), BT (Balint)

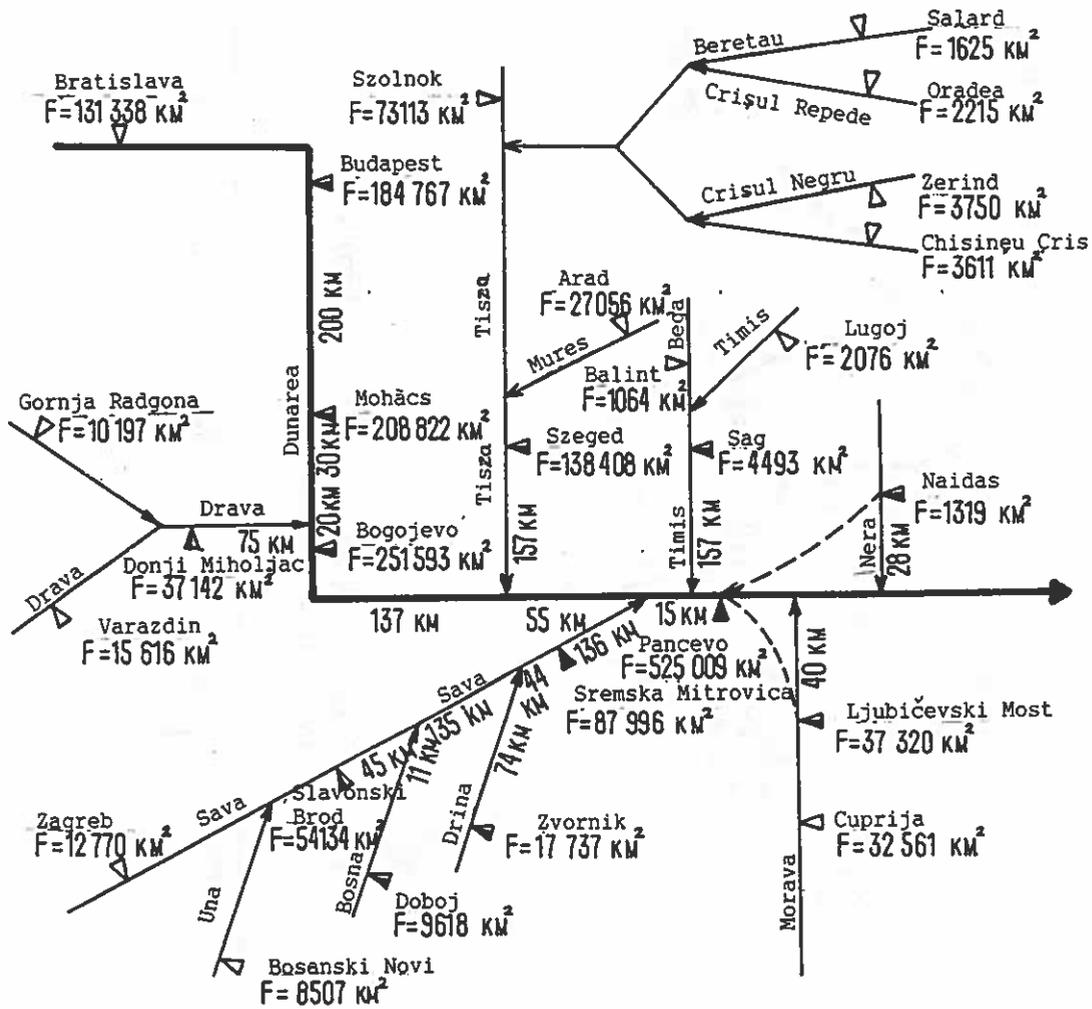
\* Relation valable pour  $Q^{(LG)} > 200 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Sinon:  $Q^{(SAG)} = Q^{(LG)} + Q^{(BT)}$

Ordonnées journalières de la crue relatives au débit maximum  
de celle-ci

Tableau N°. 3

| Rivière | Station | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   |
|---------|---------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Bosna   | Doboj   | 0 | 0,30 | 1,00 | 0,57 | 0,30 | 0,18 | 0,10 | 0,05 | 0,02 | -    | -    | -    | -    |
| Drina   | Zvornik | 0 | 0,12 | 0,41 | 1,00 | 0,65 | 0,41 | 0,25 | 0,12 | 0,06 | 0,02 | -    | -    | -    |
| Timiș   | Sag     | 0 | 0,28 | 1,00 | 0,53 | 0,25 | 0,13 | 0,07 | 0,02 | -    | -    | -    | -    | -    |
| Morava  | L. Most | 0 | 0,13 | 0,35 | 0,66 | 0,89 | 1,00 | 0,93 | 0,79 | 0,69 | 0,46 | 0,29 | 0,15 | 0,05 |
| Nera    | Naidas  | 0 | 1,00 | 0,58 | 0,30 | 0,15 | 0,07 | 0,02 | -    | -    | -    | -    | -    | -    |

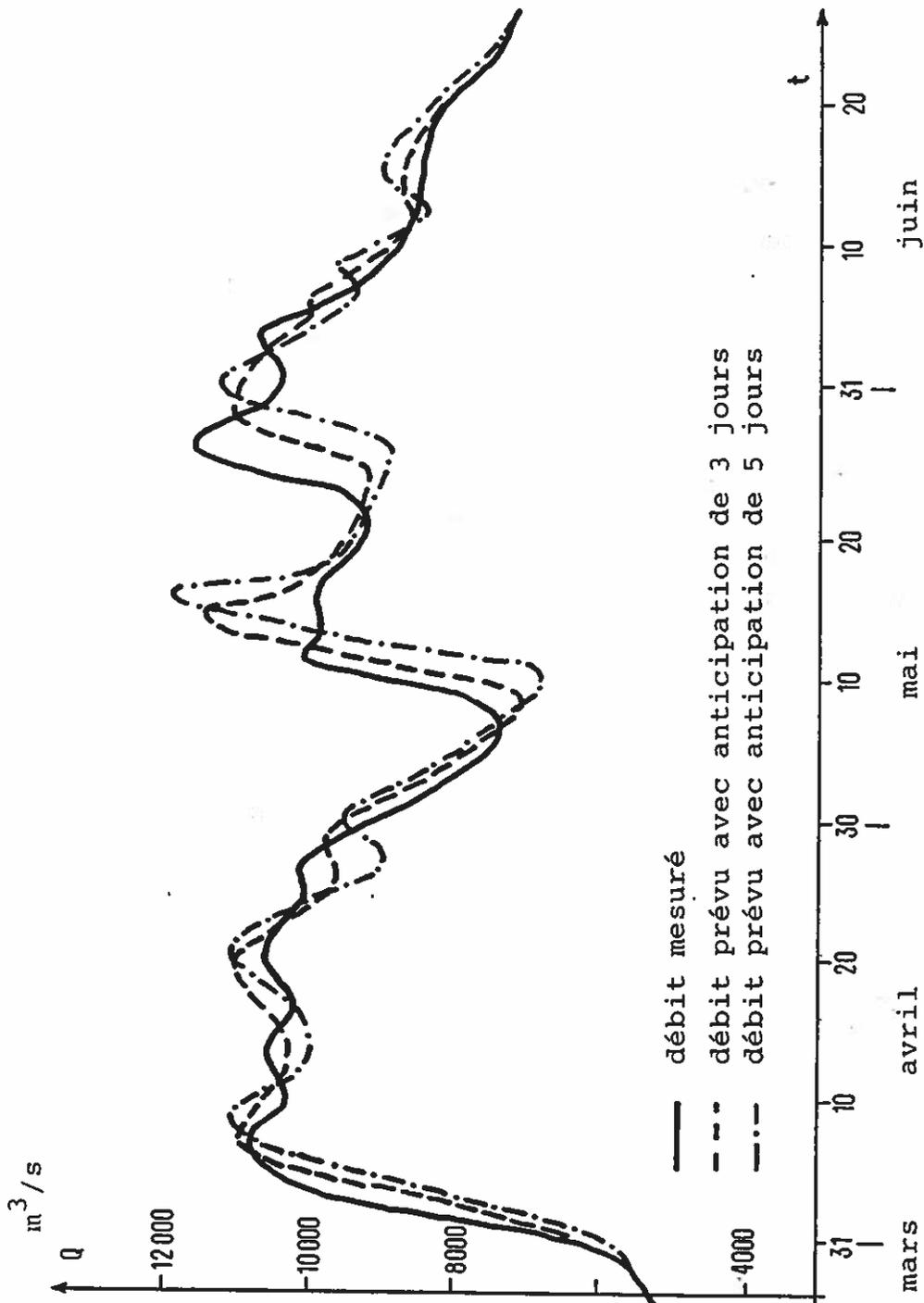
Fig. 1 - Stations hydrométriques et schéma de calcul utilisés pour l'élaboration de la prévision des débits du Danube à l'entrée du lac Portes de Fer I.



Légende

- ▽ Stations hydrométriques utilisées dans la prévision des vecteurs de débits aux stations hydrométriques prédictrices
- ▽ Stations hydrométriques prédictrices
- ▽ Stations hydrométriques où l'on applique la procédure de réactualisation des débits simulés

Fig. 2 - Hydrographes affluents dans le lac Portes de Fer I.



"La procédure opérationnelle Danubius Aval  
pour la prévision hydrologique sur le sec-  
teur roumain du Danube"

(Dr. ing. Petru Serban, ing. Ciprian Corbus-  
Institut de Météorologie et Hydrologie Buca-  
rest, Roumanie)

Résumé

La procédure opérationnelle de prévision proposée, DANUBIUS AVAL, permet l'élaboration journalière, à une anticipation de 1-7 jours, de la prévision des niveaux et des débits sur le secteur roumain du Danube. Cette procédure englobe un modèle de propagation, une méthode de réactualisation des débits transmis et une série de méthodes opératives de prévision pour la détermination des vecteurs de débits prévus pour 7 jours dans les sections prédictives qui constituent des entrées dans le modèle de propagation.

Les expériences effectuées ont démontré que par la procédure proposée on obtient de bons résultats dans le cas de son application en temps réel, particulièrement pour les premiers 5 jours de prévision.

Avant-propos

L'accroissement des exigences concernant les prévisions hydrologiques de plus en plus diversifiées suite à la création de certains objectifs sociaux-économiques dont l'activité se trouve dans une étroite connexion avec le régime du Danube, ainsi que les exigences traditionnelles de la navigation et des activités de protection contre les inondations et les glaces, ont imposé la création d'une procédure opérationnelle qui puisse permettre l'élaboration journalière

à une anticipation de 1-7 jours, de la prévision des niveaux et des débits sur le secteur roumain du Danube.

Pour cette raison, on détermine d'abord pour le même intervalle de temps, les débits prévus défluentes appartenant au système hydro-énergétique et de navigation Portes de Fer et, à l'aide de certaines méthodes opératives de prévision, les débits prévus pour une série de stations prédictoires situées sur les affluents roumains du Danube. Par la suite, ces vecteurs de débits prévus sont transmis successivement sur des secteurs du lit du Danube et de ses affluents Jiu, Olt, Arges, Ialomița, Siret, Buzau et Prut, en obtenant ainsi les niveaux et les débits prévus sur le secteur roumain du Danube.

## 1. Le modèle de calcul de la propagation des débits

### 1.1 L'algorithme du modèle

Un secteur quelconque de rivière peut être considéré comme un système linéaire, où la sortie repose sur l'équation discrète:

$$Q_d(m) = \Delta t \sum_{i=p}^m Q_a(i)^{u_i(m-i+1)}, \quad m=1,2,\dots \quad (1)$$

$$p = \begin{cases} 1 & \text{si } m \leq n \\ m-n+1 & \text{si } m > n \end{cases}$$

où  $Q_d(m)$  représente l'ordonnée pour le temps  $m \Delta t$  du hydrographe deffluent du secteur de rivière;

$Q_a(i)$  représente l'affluent moyen pour l'intervalle  $[(i-1) \Delta t, i \Delta t]$ ;

$U_i(m-i+1)$  représente l'ordonnée au temps  $(m-i+1)\Delta t$  de la fonction noyau du système pour une impulsion unitaire  $Q_a(i)$  uniformément distribuée sur l'intervalle  $[(i-1)\Delta t, i\Delta t]$ ;

$n$  représente le nombre considéré d'ordonnées de la fonction noyau. Les ordonnées de la fonction noyau  $u(j)$ ,  $j=1,2,\dots,$

$$u(j) = \begin{cases} 1 - \frac{k}{\Delta t} \left[ 1 - e^{-\frac{\Delta t}{k(1-x)}} \right], & \text{pour } j=1 \\ \frac{k}{\Delta t} \left[ 1 - e^{-\frac{\Delta t}{k(1-x)}} \right]^2 e^{-\frac{j\Delta t}{k(1-x)}}, & \text{pour } j=2,3,\dots \end{cases} \quad (2)$$

## 1.2 Le calibrage du modèle de propagation

Afin de calibrer le modèle de propagation on a réalisé tout d'abord la modélisation topologique du secteur roumain du Danube. Dans la réalisation de la modélisation topologique on a tenu compte des caractéristiques hydrauliques et géométriques du lit du Danube, des sections de prévision où sont situées les sections hydrométriques: Gruia, Cetate, Calafat, Bistrița, Bechet, Corabia, Tr. Magurele, Zimnicea, Giurgiu, Oltenița, Calarași, Fetești, Cernavoda, Hirșova, Brăila, Galați, Isaccea et Tulcea, ainsi que des confluences du Danube avec ses principaux affluents roumains considérés: Jiu, Olt, Argeș, Ialomița Siret et Prut.

Pour chaque secteur on mentionne la longueur  $L(\text{km})$  au début de chaque noeud principal, et on marque la superficie du bassin afférent  $F(\text{km}^2)$ .

De l'analyse des profils transversaux élevés entre 1982-1987, il résulte que le lit du Danube est relativement stable, ce qui a permis la

réalisation de certaines courbes de débit multiannuelles à partir des mesurages des débits.

Les débits écoulés sur les branches du Danube sont déterminés à l'aide des coefficients de répartition, qui représentent le rapport établi entre le débit d'eau sur le bras respectif et le débit d'eau du Danube en son entier.

Utilisant les débits produits durant les années caractéristiques 1965, 1970, 1975 et 1980-1986, on a déterminé les paramètres optima  $x$  et  $k$  du modèle de propagation à l'aide de la méthode TRIAL-AND-ERROR.

## 2. La méthode de réactualisation des débits propagés

La méthode de réactualisation utilisée est appliquée différemment pour la branche d'accroissement que pour celle de décroissement de l'hydrogramme propagée à la station hydrométrique aval.

Les relations de réactualisation sont [2]:

$$Q_p(t+1) = Q_M(t) + [Q_S(t+1) - Q_S(t)] \cdot CP(t)$$

$$Q_p(t+n) = Q_p(t+n-1) + [Q_S(t+n) - Q_S(t+n-1)] \cdot CP(t+n-1) \quad n \geq 2,7 \quad (3)$$

Les facteurs de correction CP sont calculés:

- pour la phase d'accroissement de l'hydrogramme:

$$CP(t) = \left[ \frac{Q_M(t) - Q_M(t-2)}{Q_S(t) - Q_S(t-2)} \right]^{0,7}$$

$$CP(t+n) = [CP(t+n-1)]^{0,7}, \quad n \geq 4,6 \quad (4)$$

- pour la phase de décroissement de l'hydrogramme:

$$CP(t) = \frac{Q_M(t)}{Q_S(t)}$$

$$CP(t+n) = \frac{Q_P(t+n)}{Q_S(t+n)}, \quad n = \overline{1,6} \quad (5)$$

où  $Q_M$ ,  $Q_S$  et  $Q_P$  représentent les débits mesurés, simulés et respectivement prévus  $t$  représente le moment de l'élaboration de la prévision.

### 3. La détermination des vecteurs des débits prévus à une anticipation de 7 jours pour les sections prédictives

Les calculs de prévision sont effectués compte tenu des sections prédictives sur les principaux affluents roumains du Danube:

Podari sur le Jiu, Stoenesti sur l'Olt, Budești sur l'Argeș, Slobozia, sur la Ialomița, Lungoci sur le Siret, Magura sur le Buzau et Oancea sur le Prut.

Aux stations susmentionnées la prévision à une anticipation de 7 jours est élaborée à partir de la méthode de tendance et de la méthode volumétrique [3].

### 4. L'évaluation des erreurs des prévisions

Pour l'évaluation des erreurs des prévisions on utilise non seulement des critères graphiques mais aussi une série de critères numériques à savoir:

- a) L'erreur moyenne quadratique RMSE enregistrée entre l'hydrogramme mesuré et prévu prévu avec  $n = 1,7$  jours d'anticipation:

$$\text{RMSE}_n = \sqrt{\frac{F}{N}} \quad (6)$$

$$F = \sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2 \quad (7)$$

où

$Q_i$  représente le débit mesuré;

$\hat{Q}_i$  représente le débit prévu;

$F$  représente la variance résiduelle;

$N$  représente le nombre des valeurs des débits.

- b) En vue de l'élaboration d'un critère universel qui ne soit pas dépendant de la valeur des débits et de la longueur de la série de valeurs, Nash et Sutcliffe ont réalisé une comparaison entre la variance résiduelle  $F$  et la variance initiale  $F_0$ :

$$F_0 = \sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 \quad (8)$$

où  $Q$  représente les débits mesurés.

Nash et Sutcliffe ont exprimé cette comparaison:

$$\text{NTD}_n = 1 - \frac{F}{F_0} \quad (9)$$

- c) Le coefficient d'autocorrélation  $r_1$

Pour souligner le degré de corrélation des erreurs de prévision et pour tirer les conclusions concernant les possibilités d'amélioration du modèle, on utilise le coefficient d'autocorrélation de degré 1:

$$r_{1n} = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+1} - \bar{x})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

où  $X_i = Q_i - \hat{Q}_i$

d) La courbe de fréquence des erreurs

Très souvent on est intéressé par l'écart  $H_n$  apparu entre les niveaux mesurés  $H_i$  avec  $n = 1,7$  jours d'anticipation.

Suite à l'application de la procédure DANUBIUS AVAL pour la prévision des débits et des niveaux sur le secteur roumain du Danube, on arrive à quelques conclusions plus importantes, à savoir:

- par la procédure proposée on obtient de bons résultats en l'appliquant en temps réel, particulièrement pour les 5 premiers jours de prévision;
- la nécessité de déployer une activité hydro-métrique de bonne qualité, en effectuant des mesurages de débits pour les phases de régime hydrologique afin de connaître les éventuelles modifications des courbes de débits.

4.2.2.8 En Union des Républiques Socialistes Soviétiques

Voir 4.1.1.8

4.3 Prévisions du régime des glaces

4.3.1 Méthodes de formulation des prévisions à longue échéance de l'apparition de glaces sur le Danube

4.3.1.1 En République Fédérale d'Allemagne

Voir 4.1.2.1

#### 4.3.1.2 En République d'Autriche

En Autriche des prévisions à longue échéance du régime des glaces ne sont pas établies (voir 4.1.1.2).

#### 4.3.1.3 En République Fédérative Tchèque et Slovaque

En République Fédérative Tchèque et Slovaque des prévisions à longue échéance du régime des glaces ne sont pas établies (voir 4.1.1.3).

#### 4.3.1.4 En République de Hongrie

Prévision des phénomènes de glaces sur le Danube et la Tisza György Hirling  
(Centre de Recherches Scientifiques Hydrauliques Budapest)

##### 1. Phénomènes de glaces sur les fleuves

En Hongrie le climat au cours des mois d'hiver se distingue par des températures négatives et souvent par un fort gél de longue durée. Il s'ensuit qu'il convient de tenir compte des diverses formes des phénomènes de glaces sur les fleuves de la Hongrie et sur les moyens de protection applicables dans la pratique contre les crues. Dans des conditions défavorables les crues accompagnées de glace peuvent causer de grands dommages à l'économie nationale, ainsi la publication de prévision de ces crues est une tâche importante d'ordre opérationnel.

En automne la température de l'air baisse. Cette baisse de température est accompagnée d'une baisse de la température de l'eau. En hiver, par suite d'une baisse brusque de la température de l'air accompagnée de températures négatives

tives, on peut s'attendre à l'apparition des glaces sur les cours d'eau.

En hiver, auprès de différentes conditions météorologiques on observe différentes formes de phénomènes de glaces sur les fleuves. En résultat de la baisse des températures de l'air, le charriage apparait de nouveau même quand le fleuve est entièrement libre des glaces. La prise du fleuve est suivie du charriage qui à son tour peut être suivi par la prise du fleuve. On a fréquemment observé sur le Danube des hivers sans glaces (Horvát 1979).

La grande variété du régime des glaces est due au grand nombre de facteurs, qui influent les phénomènes de glaces et à leur variabilité.

En résultat de l'établissement de relations graphiques entre les éléments météorologiques et hydrologiques, ainsi que des paramètres des relations prévisionnelles, élaborées en URSS, la prévision des caractéristiques suivantes du régime de glaces a été assurée:

- a) date du début du charriage dans la période automne-hiver
- b) date du début de la prise du fleuve
- c) épaisseur de la glace
- d) date de la rupture de la couche de glaces
- e) date de la disparition des glaces

## 2. Prévision des dates du commencement des charriages en automne/hiver

### 2.1 Prévision à échéance moyenne de la date de l'apparition des glaces

La méthode est fondée sur la relation entre les éléments hydrométéorologiques suivants:

- a) la somme des températures négatives moyennes journalières de l'air requise pour la formation des glaces;
- b) la température de l'eau au moment où la température de l'air passe des valeurs positives à des valeurs négatives (température primaire de l'eau), (Komarov 1947, Chouliakovski 1947; Lászloffy et Szesztai 1964; Lászloffy et Szesztai 1965).

Tenant compte de ce qui précède, la relation entre la somme de chaleur requise pour la formation des glaces et la température primaire de l'eau a été établie pour les diverses sections du Danube et de la Tisza.

Pour la prévision de la date de l'apparition des glaces on peut avoir recours aux deux prévisions météorologiques suivantes:

- a) prévision à échéance moyenne de la température de l'eau pour diverses régions du pays (3-4 jours);
- b) prévision météorologique décadaire des températures d'eau maxima et minima pour 24 heures.

La prévision de la date de l'apparition des glaces est établie à l'aide de la comparaison journalière des sommes de température d'air négative, calculées à l'aide d'équations, aux sommes des températures d'air négatives pronostiquées.

## 2.2 Prévision à courte échéance de la date du commencement du charriage en automne/hiver

La prévision à courte échéance de la date du commencement du charriage est établie quand, sur la base de la prévision décadaire, on s'attend à l'apparition du charriage dans quelques jours (environ 4 jours) sur une section déterminée du fleuve. A l'aide des prévisions à courte échéance on peut vérifier et préciser les dates pronostiquées de la prévision à échéance moyenne.

La méthode fondamentale de détermination de la baisse de la température de l'eau est basée sur le bilan thermique composé de la somme positive et de la somme négative de la chaleur (Starosolszky 1969 ; Lászlóffy et Szesztai 1965 ; Chouliakovski 1960; Balasova 1968).

Le bilan thermique des eaux de surface dans un intervalle de temps donné accompagné d'une baisse de la température de l'eau, peut s'exprimer par la formule suivante:

$$\mathcal{L}(\bar{\Theta}_w - \Theta_{sw}) + B = 0 \quad (1)$$

où  $\bar{\Theta}_w$  = température moyenne de l'eau dans le cours d'eau en °C;

$\Theta_{sw}$  = température de l'eau à la surface en °C;

$\mathcal{L}$  = coefficient de l'échange thermique entre l'atmosphère et l'eau en Joule/cm<sup>2</sup> °C jour;

B = volume spécifique à la limite en Joule/cm<sup>2</sup> jour;

Tenant compte que la température de l'eau à la

surface est  $\bar{\theta}_{sw} = 0$  et que l'indice "n" caractérise la date de l'apparition des glaces, on obtient l'équation qui détermine les conditions primaires de la formation des glaces, à savoir

$$\alpha(\theta_w)_n \leq -\beta_n \quad \text{ou} \quad (\theta_w)_n \leq -\frac{\beta_n}{\alpha_n} \quad (2)$$

Chouliakovski (1960) a élaboré une méthode de prévision de la date de l'apparition des glaces qui a été utilisée par la suite par d'autres auteurs et même perfectionnée par certains. (Par exemple Stantchinova, 1973). Faisant appel aux données hydrologiques des stations situées sur le Danube et sur la Tisza on a pu à l'aide des ordinateurs établir la valeur de la vitesse moyenne du courant et la superficie de la surface d'eau sur les différents secteurs du fleuve auprès de différents débits d'eau.

Avec une approximation fortuite on peut calculer et comparer les deux parties de l'inégalité (2). Si l'inégalité est résolue on peut s'attendre à l'apparition des glaces sur le secteur donné du fleuve au moment donné.

### 3. Prévision des dates du commencement de la prise du fleuve

La prévision de la date du début de la prise du fleuve est réalisée quand sur le secteur du fleuve donné apparait le charriage et on s'attend à ce que la température de l'air reste négative et la quantité des glaces flottantes augmente.

Chouliakovski (1960) propose d'utiliser les équations suivantes pour calculer la quantité ther-

mique négative et la température critique requises pour la formation de la prise du fleuve.

$$(\sum \theta_-)_A = -10,3 u^{1,22} b^{0,39} \quad (3)$$

$$\theta_{kr} = -0,65 \cdot u \cdot b^{0,5} \quad (4)$$

où  $u$  = vitesse moyenne du courant en mètre/sec, ;

$b$  = largeur du profil, en m.

A l'aide de la formule de Chouliakovski (1960) a été calculée la quantité thermique requise pour la prise du fleuve et la température critique sur le Danube et la Tisza.

En ce qui concerne la quantité thermique négative requise pour la prise du fleuve, il a été constaté que l'équation de Chouliakovski (1960) est réalisable sur le secteur inférieur (Budapest-Mohács) et n'est pas réalisable sur le secteur supérieur (Bratislava-Budapest) du Danube. Pour cette raison pour le secteur supérieur on recommande d'utiliser l'équation suivante:

$$(\sum \theta_-)_A = -17,48 u^{1,144} b^{0,428} \quad (5)$$

qui se distingue un peu de celle proposée par Chouliakovski.

Pour la Tisza on peut utiliser l'équation de Chouliakovski sans modification.

Pour le calcul des températures critiques de la prise du fleuve, l'équation de Chouliakovski (1960) qui a été transformée pour le Danube s'exprime comme suit:

$$\Theta_{kr} = -0,423 u^{1,048} b^{0,476} \quad (6)$$

Pour la Tisza on recommande d'utiliser l'équation de Chouliakovski sans modification.

La prévision de la date du commencement de la prise du fleuve est établie par le calcul de la somme relative de la chaleur et de la température critique requise pour la prise du fleuve et par la comparaison de ces données à la somme de température journalière pronostiquée .

#### 4. Prévision de l'épaisseur de la glace

Après la formation de la prise du fleuve quand les températures d'air négatives persistent, l'épaisseur de la glace augmente. La couche de glace croit en résultat de la perte de la chaleur de la masse à travers la glace et la couche de neige sur la glace.

En cette période on peut éventuellement publier une prévision de l'épaisseur de la glace pour les jours suivants.

Les chercheurs qui s'occupent de ce thème ont élaboré de nombreuses formules de prévision de l'épaisseur des glaces sur les différents fleuves.

Dans la publication de l'OMM "Hydrological Forecasting Practicies", (1975) figurent des formules approximatives, utilisées dans la pratique pour la prévision de l'épaisseur de la glace.

Pour la prévision de l'épaisseur des glaces dans des profils donnés du Danube et de la Tisza, il convient d'avoir les données suivantes:

- a) épaisseur de la glace initiale mesurée ( $d_g$ ) en cm;
- b) hauteur de la couche de neige sur la glace ( $d_s$ ) en cm;
- c) densité de la neige ( $\rho$ ) en  $\text{kg/m}^3$ .

En outre, il s'avère nécessaire de disposer des données suivantes:

- a) température moyenne prévue de l'air ( $\bar{\theta}$ ) en °C et
- b) échéance de la prévision de la température de l'air ( ) jours.

#### 5. Prévision de la date de la rupture des glaces

La rupture des glaces et la disparition totale des glaces sur le fleuve résulte du fonctionnement des facteurs thermiques et mécaniques qui agissent en même temps, mais dont l'influence diffère. Sous l'effet thermique de la fonte la solidité de la glace diminue considérablement. Sous l'effet des forces mécaniques (vague de crue) toute la couche de glace est détruite et les conditions de charriage apparaissent. L'interaction de ces facteurs apparaît de manière différente à divers points du globe terrestre.

Le Danube et la Tisza appartiennent à la catégorie des fleuves qui coulent du Nord au Sud et sur lesquels, sauf des cas exceptionnels, le mouvement de la glace est provoqué essentiellement par le facteur thermique. Le charriage et la disparition totale des glaces sont des processus

complexes et c'est pour cette raison que jusqu'à ce jour il n'y a pas de méthodes générales, fiables de tout point de vue, pour la formulation des prévisions. C'est pour cette raison qu'actuellement on utilise pour la prévision de la date de la rupture des glaces et de la disparition totale des glaces des méthodes simplifiées, indirectes et approximatives.

Nous avons construit le graphique de deux variables où figurent à l'axe horizontale la somme des températures d'air négatives à partir de la date du commencement de la prise du fleuve jusqu'à l'établissement de températures d'air positives, et à l'axe verticale la somme des températures d'air positives à partir de la date de l'établissement de températures positives jusqu'à la date de la rupture des glaces. Par suite de nombreux points ainsi obtenus a été tracée une droite ou une parabole.

#### 6. Prévision de la date de la disparition des glaces sur le fleuve

Après un temps prolongé de températures d'air positives le fleuve est totalement libre des glaces. Ce phénomène se produit par deux voies. Dans le premier cas la somme des températures négatives n'atteint pas la valeur requise pour la prise du fleuve; dans ce cas seul le charriage apparaît, qui disparaît après un certain temps auprès des températures d'air positives. Dans le deuxième cas il y a une prise du fleuve et, après un certain temps de températures d'air positives, on observe une rupture de la couche de glace et le commencement du charriage. A la suite de l'élévation de la température de l'eau la glace disparaît totalement.

La prévision de la date de la disparition des glaces est établie de la manière suivante. Après l'établissement de la date des températures d'air positives on détermine la quantité de température d'air négative qui est obtenue au moyen de l'addition des valeurs à partir du premier jour du charriage jusqu'au jour d'apparition des températures d'air positives. A l'aide de ces données on peut calculer d'après un graphique ou une équation la quantité de chaleur requise pour que le fleuve soit totalement libéré des glaces. Par la suite, cette quantité de chaleur est comparée à la somme des températures d'air positives effectives journalières observée jusqu'à la date de la publication de la prévision et à la somme des températures d'air journalières calculées d'après la prévision.

#### 7. Etablissement des prévisions journalières continues des phénomènes de glaces

A l'aide des méthodes décrites dans les parties précédentes et utilisant des appareils mathématiques on peut pronostiquer de manière continue et complexe les phénomènes de glaces sur certains secteurs du Danube et de la Tisza et pour quelques profils de ces fleuves.

La continuité des prévisions des phénomènes signifie que l'on entame à partir du 1<sup>er</sup> novembre le rassemblement et le dépouillement journaliers des données météorologiques et hydrologiques et, se fondant sur des phénomènes de glaces effectives, on publie deux fois par semaine une prévision des phénomènes de glaces. Le recueil des données météorologiques et hydrologiques se poursuit jusqu'à la fin de l'hiver (mi-mars).

La complexité des prévisions des phénomènes de glaces consiste en ce que le système de prévision des phénomènes de glaces offre la possibilité de pronostiquer divers phénomènes de glaces quand on connaît le caractère du phénomène de glace au moment donné.

Le service d'Etat des prévisions hydrologiques a élaboré un programme pour ordinateur aux fins de prévision des phénomènes de glaces. Ce programme a utilisé les méthodes d'écrites ci-haut.

Les programmes prévisionnels, qui de par eux-mêmes ne donnent pas de mauvais résultats, se suivent automatiquement dans un ordre logique en commençant par la prévision à échéance moyenne pour la prévision de la date de la disparition des glaces.

Les prévisions des phénomènes de glaces sont publiées régulièrement tous les 3-4 jours (2 fois par semaine) et en cas de nécessité, quand les conditions du temps et la situation des glaces subissent des changements brusques, elles sont publiées chaque jour. Il existe également des possibilités de publier des prévisions décennales. La prévision des dates des phénomènes de glaces (début du charriage, prise du fleuve, rupture et disparition des glaces) est établie pour les secteurs des fleuves suivants:

Danube: Bratislava-Komárom, Komárom-Budapest,  
Budapest-Dunaföldvár, Dunaföldvár-Mohács

Tisza: Tiszabecs-Vàsàrosnamény, Vàsàrosnamény-  
Tokaj, Tiszafüred-Szolnok, Szolnok-  
Szeged.

Fréquence de l'émission des prévisions

| Secteur du fleuve,<br>Danube, Tisza | P é r i o d e          |                 |                                     | Disparition<br>des glaces |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------------|
|                                     | Charriage<br>d'automne | Prise du fleuve | Rupture de la<br>couche<br>de glace |                           |
| Bratislava-Komárom                  | A, B, C.               | A, B, C,        | A, B, C,                            | A, B, C                   |
| Komárom-Budapest                    | A, B, C,               | A, B, C,        | A, B, C,                            | A, B, C                   |
| Budapest-Dunaföldvár                | A, B, C,               | A, B, C,        | A, B, C,                            | A, B, C                   |
| Dunaföldvár-Mohács                  | A, B, C,               | A, B, C,        | A, B, C,                            | A, B, C                   |
| Tiszabecs-Vásáros-<br>namény        | A, B, C,               | A, B, C,        | A, B, C,                            | A, B, C                   |
| Vásárosnamény-Tokaj                 | A, B, C,               | A, B, C,        | A, B, C,                            | A, B, C                   |
| Tiszafüred-Szolnok                  | A, B, C,               | A, B, C,        | A, B, C,                            | A, B, C                   |
| Szolnok-Szeged                      | A, B, C,               | A, B, C,        | A, B, C,                            | A, B, C                   |

a) - par décade (en cas de nécessité)

b) - tous les 3-4 jours, systématiquement

c) - chaque jour (en cas de changement brusque, selon la nécessité)

Liste des publications:

Horvath S., 1979: A Duna jégviszonyai  
VITUKI Közlemények, No. 21. Budapest

Lászloffy W., Szesztay K., 1964: Vorhersage der  
Eisverhältnisse in Flüssen mit besondere  
Berücksichtigung der Donau, 2. Konferenz  
der Arbeitsgemeinschaft der Donau-länder  
für hydrologische Vorhersagen, Wien

Lászloffy W., Szesztay K., 1965: A folyók jégvi-  
szonyainak előrejelzése, Beszámoló a  
VITUKI munkájáról.  
OVF kiadványa, Budapest

Starosolszky O, 1969: A jég a vízépitésben  
VITUKI tanulmányok, 1969

WMO (World Meteorological Organisation), 1975:  
Hydrological Forecasting Practicies.  
WMO-Operational hydrology, Report No.6  
Geneva, Switzerland.

Балашова Ю.В., 1968: Состояние и практическое использо-  
вание методов краткосрочных прогнозов замерзания  
рек и водохранилищ. Обзор. Гидрометцентр СССР.  
Обнинск.

Комаров В.Д., 1947: Методы краткосрочных прогнозов вре-  
мени проявления сала и установления ледостава на  
реках. Труды ЦИП-а, вып. 2/28.

Шуляковский Л.Г., 1947: К методике краткосрочных прог-  
нозов замерзания и вскрытия рек.  
Труды ЦИП-а, вып. 5/32.

Шуляковский Л.Г., 1960: Появление льда и начало ледо-  
става на реках, озерах и водохранилищах. Расчеты  
для целей прогнозов. Гидрометиздат, Москва.

Станчикова А., 1973: Установление зависимости для прог-  
ноза ледовых явлений на основании расчета элементов  
теплового баланса и на основании предполагаемого  
развития метеорологических элементов. Рабочая груп-  
па по научной гидрологии бассейна р. Дунай при Ду-  
найской Комиссии. Сборник работ. I. Ледовый режим,  
Будапешт.

#### 4.3.1.5 En République Socialiste Fédérative de You- slavie

Voir 4.1.2.5

#### 4.3.1.6 En République de Bulgarie

Le Secrétariat n'a pas reçu de matériaux.

#### 4.3.1.7 En Roumanie

##### Méthode de prognose des niveaux pendant les pé- riodes de gel

(Ch. Alexandrescu, Institut de Météorologie et  
Hydrologie Bucarest, Roumanie)

Les phénomènes de glace sur le Danube (débâcles, prises du fleuve, blocage avec des hausses des niveaux) créent des difficultés pour la navigation, dans l'exploitation des systèmes hydroénergétiques Portes de Fer I et II ainsi que dans les activités économiques utilisant l'eau du fleuve.

La mise en fonction des systèmes hydroénergetiques Portes de Fer I et II a produit des modifications dans le régime de la glace flottante du Danube, dues à des variations brusques des débits sortants et surtout à l'effet de barrage, déterminant une discontinuité dans la débâcle et dans la formation de la prise du fleuve en aval dans ce secteur.

Ces modifications sont les suivantes:

- absence de la glace flottante jusqu'à Calafat et diminution des phénomènes de glace dans le secteur Calafat - Giurgiu

- diminution de la fréquence d'apparition de la glace flottante pendant les hivers normaux.

Vu ces modifications, cette étude-ci a pris en considération, pour l'analyse et l'élaboration des relations de prognose, l'intervalle 1971-1987, quand les influences mentionnées ont été provoquées par le SHEN - Portes de Fer et quand l'écoulement de l'eau a été fait dans les conditions d'endiguement pratiquement total du lit du Danube.

Le Tableau 1 présente des phénomènes de glace apparus dans les principales stations hydrométriques pendant l'intervalle ci-dessus mentionné.

Pour mettre en évidence les lois concernant les formations de glace sur le secteur roumain du Danube, dépendant des températures négatives de l'air et implicitement de l'eau, on a utilisé les données statistiques pour un intervalle plus long, en retenant comme intéressants pour l'ensemble des phénomènes, les aspects suivants:

- La classification des hivers selon les critères de la température de l'air et de l'étendue des phénomènes de glace montre une fréquence de 15% d'hivers très froids avec des phénomènes d'hiver intenses et de longue durée (de plus de 2 mois), 45% d'hivers moyens avec débâcle et, par intermittence, avec prise du fleuve pendant moins d'un mois et de 40% d'hivers légers avec des phénomènes faibles et sans glace.
- La fréquence d'apparition des phénomènes de glace dans le secteur en aval de Giurgiu est de 70% - 80%, c'est-à-dire, que la glace est apparue pendant 13 hivers durant les derniers 18 hivers.

- La glace flottante apparaît, en moyenne, dans la première décennie du mois de janvier, les apparitions les plus prématurées étant dans la deuxième décennie du mois de décembre et les plus tardives dans la première décennie du mois de février.

Ce grand écart de temps possible pour la débâcle peut être expliqué par la variabilité des conditions climatiques dans la zone inférieure du Danube.

- La prise du fleuve apparaît seulement pendant les hivers très froids (approximativement une fois par décennie) après 10-20 jours de débâcle ayant comme intervalle moyen de temps d'apparition les décades 2 et 3 du mois de janvier.
- Les embâcles avec hausses apparaissent surtout quand la prise du fleuve est formée par l'arrêt de la glace flottante, arrivant à des valeurs très grandes dans les années à hivers très froids 1941-42, 1962-63, 1984-85 et 1986-87.
- La variation le long du Danube des hausses maxima des niveaux pendant les hivers ci-dessus mentionnés est présentée dans la figure 1. En examinant ce graphique on peut constater:

Les hausses maxima sur le secteur de Gruia à Turnu Magurele sont beaucoup plus basses pour les derniers hivers très froids (1984-15 et 1986-87) en comparaison avec les hivers d'avant 1970, quand on a mis en fonction le SHEN - Portes de Fer

- Le secteur avec les plus grandes hausses maxima reste, même dans les conditions actuelles, Giurgiu - Brăila, avec des valeurs maxima de 400-500 cm dans la zone Oltenita - Calarasi diminuant jusqu'à 300-400 cm dans la zone Calarasi - Brăila.

La prognose hydrologique de la glace sur le Danube se réfère aux éléments suivants:

- La formation et l'amplification de la glace comme moment de temps et la localisation du secteur d'apparition;
- les formes d'apparition des phénomènes de glace (glace flottante, prise du fleuve, embâcles avec hausses de niveau)
- niveaux et débits sous l'influence des phénomènes de gelée surtout aux embâcles avec hausses de niveau;
- la disparition des formations de glace comme moment de temps et localisations sur les secteurs du Danube.

Les informations hydrométéorologiques sur lesquelles se fonde l'élaboration des prognoses sont les suivantes:

- observations visuelles aux stations hydrométriques sur l'état de la glace flottante ou de la prise du fleuve;
- niveaux mesurés et débits calculés aux stations hydrométriques sur le Danube, chaque jour ou deux fois par jour;
- la température de l'eau mesurée aux principales stations hydrométriques;
- la température de l'air mesurée aux stations météorologiques situées en général dans les mêmes ports que les stations hydrométriques;
- informations sur la débâcle sur les affluents.

En ce qui concerne la prognose de l'apparition et de la disparition des phénomènes de glace sur le Danube, le tableau 2 présente les conditions nécessaires pour l'apparition de ces phénomènes

du point de vue de l'arrivée aux valeurs limites (de la température de l'eau), de la durée des températures continuellement négatives de l'air ainsi que leur somme.

Concernant l'anticipation de la prévision de l'apparition et la disparition des phénomènes de glace, on fait la mention que celle-ci, ayant comme support la prognose météorologique, peut être à courte, tout au plus à moyenne échéance (une semaine tout au plus).

La prévision de l'apparition et de la disparition de la glace constitue à son tour, un support très utile pour la prévision des niveaux pendant les périodes avec des agglomérations de glace accompagnées systématiquement de grandes hausses des niveaux d'eau.

Comme on peut constater dans les figures NOS 1, 2 et 3, la variation en temps des hausses suit avec un décalage la variation des températures continuellement négatives de l'air.

Le brusque développement de ces hausses commence 10-15 jours après le commencement des phénomènes d'hiver. Selon la sévérité de l'hiver, les niveaux de l'eau présentent des changements de 100-150 cm jusqu'à 300-500 cm dans le secteur T. Magurele-Calarasi et de 0-50 cm jusqu'à 200-300 cm en aval de ce secteur.

L'observation concernant le décalage de temps entre les variations des hausses et celles des températures négatives a constitué la base de la méthode de prévision proposée par la suite.

Les graphiques NOS 4-6 et 7-9 présentent pour les hivers 1984-85 et 1986-87 la variation en temps des coefficients de correction  $H_i$  et la

courbe lissée des températures de l'air aux stations hydrométriques Giurgiu, Calarasi et Brai-la. Le coefficient de correction représente le rapport entre le débit réel et celui déterminé pour la courbe limnimétrique ayant à la base le niveau enregistré. L'existence de ce décalage  $\Delta t$ , propre pour chaque station (marqué sur les graphiques N<sup>OS</sup> 4-6) permet la détermination de la relation de prognose  $K_i = f(T_{air})$  où  $T_{air}$  représente la température de l'air réalisée avec  $\Delta t$  avant, sur une courbe lissée par la variation en temps.

Par la suite, on a réalisé les graphiques de liaison entre les valeurs  $k_i$  et les hausses de niveau  $\Delta H$  pour les mêmes stations (Fig. 7-9).

Les graphiques ont été réalisés pour les stations hydrométriques Giurgiu, Calarasi et Brai-la situées dans le secteur avec la plus forte manifestation des hausses de niveau comme conséquence de la prise du fleuve et des agglomérations de glace flottante dans ces zones avec de basses eaux.

Les étapes de travail et la façon d'élaborer la prévision se présentent comme suit:

- a) On obtient des informations concernant la situation de la glace (si elle existe).
- b) On obtient des informations sur la température de l'eau en surveillant l'approche de la condition limite donnée dans le tableau 1 ( $T_{eau} \rightarrow 0,2^\circ\text{C}$ ).
- c) On obtient des informations sur la température de l'air et son évolution antérieure sur la durée  $\Delta t$  (jours) du décalage en temps entre l'évolution des températures négatives de l'air et l'évolution des hausses de niveau.

- d) La réalisation par extrapolation, ayant à la base la prévision météorologique, de la courbe  $T_{\text{air}}^{\circ}$  pour l'intervalle de prévision ( $T_{\text{prog}}$ ).

- Pour la prévision à longue échéance

$$T_{\text{prog}} = T_{\text{totale}}(30 \text{ jours}) - \Delta t \text{ (décalage de temps)}$$

- Pour la prévision à courte et longue échéance

$$T_{\text{prog}} < \Delta t$$

- e) La vérification de la condition

$$T_{\text{eau}}^{(\text{prog})} < T_{\text{limite}} \text{ - (la condition de formation de la glace dans l'intervalle de prévision)}$$

- f) La détermination sur le graphique de corrélation  $K_i = f(T_{\text{air}})$  du coefficient  $K_i$ , correspondant au temps de prévision  $T_{\text{prog}}$ .

En utilisant la relation  $\Delta H - f(K_i)$  on peut déterminer la hausse pendant le temps de prévision déterminée.

On fait aussi une réactualisation de ces valeurs  $\Delta H$  prévues en partant des valeurs réalisées au moment de la prévision en corrigeant le graphique  $K_i = f(T_{\text{air}})$  ou en utilisant une courbe parallèle à la moyenne, passant par quelques valeurs  $K_i - T_{\text{air}}$  déjà réalisées.

- g) En trassant la courbe  $K_i$  pendant les journées avec des phénomènes mesurés et en extrapolant par la relation  $K_i = f(T_{\text{air}})$  on établit le moment de l'arrivée aux valeurs mi-

nima du  $K_i$  quand le maximum de hausse se produit.

- h) On détermine la valeur  $\Delta H$  max (hausse maximum) à l'aide de la corrélation  $\Delta H = f(K_i)$ .

Les graphiques de variation  $\Delta H$  pendant les hivers 1984-85 et 1986-87 (figures 2 et 3) et les graphiques complexes donnés dans les figures 10 et 11; sont utilisés dans les opérations d'interpolation des hausses à d'autres stations hydrométriques et aussi dans des conditions climatiques analogues pour d'autres hivers.

Tableau 1

Phénomènes de glace apparus aux principales stations hydrométriques pendant l'intervalle 1971-1987

| Phénomènes<br>aux s.h. | 1971 | 1972      | 1973      | 1974 | 1975 | 1976      | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985      | 1986 | 1987 |
|------------------------|------|-----------|-----------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|
| CORABIA                | S    | S         | S         | X    | X    | S         | S    | X    | S    | S    | S    | S    | X    | X    | S,P<br>ΔH | X    | S    |
| GIURGIU                | S    | S         | S         | X    | X    | S         | S    | X    | S    | S    | S    | S    | X    | X    | S,P<br>ΔH | X    | S    |
| CALARASI               | -    | -         | S,ΔH      | X    | X    | S         | S,ΔH | X    | S    | S    | S    | S    | X    | X    | S,P<br>ΔH | X    | S,Δ  |
| CERNAVODA              | S    | S,P       | S         | S    | X    | S,P       | S    | X    | S    | S    | S    | S    | X    | X    | S,P<br>ΔH | S    | S,Δ  |
| BRĂILA                 | S    | S         | S,P       | S    | X    | S,ΔH      | S    | X    | S    | S    | S    | S    | X    | X    | S,P<br>ΔH | S    | S,Δ  |
| ISACCEA                | -    | -         | -         | -    | -    | S,P<br>ΔH | S    | S    | S    | S    | X    | S    | X    | X    | S,P<br>ΔH | S    | S,Δ  |
| TULCEA                 | X    | S,P<br>ΔH | S,P<br>ΔH | S    | X    | S,P<br>ΔH | S    | S    | S    | S    | S    | S    | X    | X    | S,P<br>ΔH | S    | S,Δ  |

S - glaçons,

P - Prise du fleuve,

ΔH - Hausses des niveaux

Tableau de prévision (orientatif)  
Conditions de formation et disparition des glaçons  
sur le Danube - sur le secteur Giurgiu-Braila

Formation et amplifications des glaçons

A. Prévision à courte et moyenne échéance (1; 3 et 7 jours)

I. Glaçons:

- a)  $t^{\circ} \text{ eau} < 1^{\circ}$  et  $\sum -t^{\circ} \text{ air} \sim -50^{\circ}$ ; ( $t^{\circ} \text{ air} < -7^{\circ}$ )
- b)  $t^{\circ} \text{ eau} < 0,5^{\circ}$  et  $t^{\circ} \text{ air} \sim -30^{\circ}$ ; ( $t^{\circ} \text{ air} < -5^{\circ}$ )  
 $Q_{\text{eau}} < 5000 \text{ m}^3/\text{s}$
- c) glaçons provenant des affluents.

II. Prise du fleuve:

- a)  $t^{\circ} \text{ eau} \sim 0,2^{\circ}$
- b)  $\sum t^{\circ} \text{ air} \sim -150^{\circ}$ ; ( $t^{\circ} \text{ air} \leq -10^{\circ}$ )
- c)  $K_i < 0,75$
- d)  $Q_{\text{eau}} < 4000 \text{ m}^3/\text{s}$

III. Hausses ( $\Delta H$ )

- a)  $K_i < 0,65$
- b)  $\sum t^{\circ} \text{ air} < -150^{\circ}$  ( $t^{\circ} \text{ air} < -10^{\circ}$ )
- c)  $Q_{\text{eau}} < 5000 \text{ m}^3/\text{s}$
- d) installation de la prise du fleuve à l'arrêt des glaçons sur un secteur

B. Prévision à longue échéance

- |   |   |  |
|---|---|--|
| $t^{\circ} \text{ eau prévisionné} < 2^{\circ}$ | } | glaçons: $0 - 10^{\circ}$                  |
| $t^{\circ} \text{ air prévisionné} < 0^{\circ}$ |   | prise du fleuve: $-5^{\circ} - 15^{\circ}$ |
|   |   | hausses: $-10^{\circ} - 20^{\circ}$        |

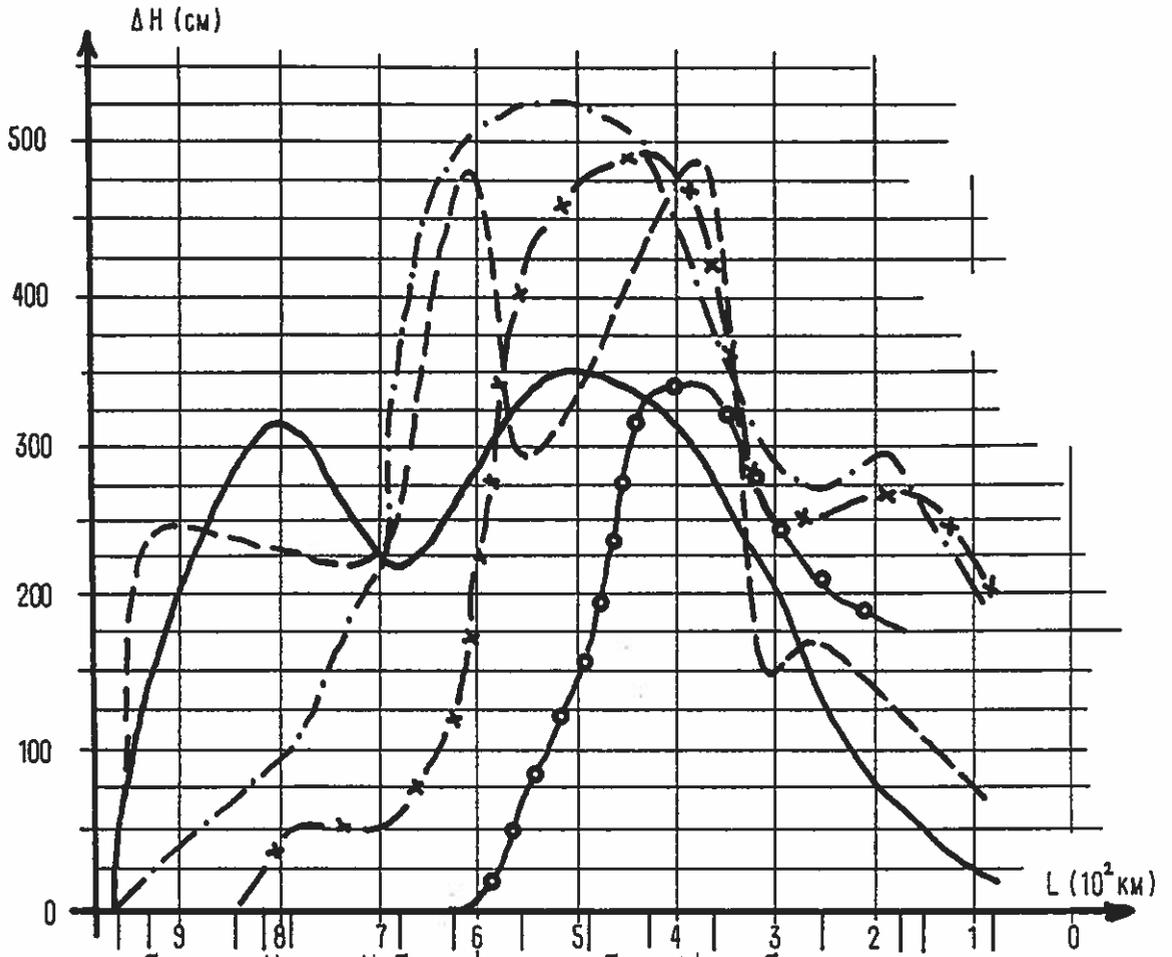
Disparition des formations de glace

glaçons:  $t^{\circ}\text{eau} = \nearrow$   
 $t^{\circ}\text{air} \nearrow 0^{\circ}; \Delta t^{\circ} \geq 10^{\circ} \rightarrow 15^{\circ}$  (pendant 3-5 jours)

prise du fleuve:

$t^{\circ}\text{eau} \nearrow$  (si elle est mesurée)  
 $t^{\circ}\text{air} \nearrow 0^{\circ}; \Delta t^{\circ} \geq \begin{cases} 15^{\circ} \rightarrow 20^{\circ} & \text{(pendant 3-5 jours)} \\ 10^{\circ} \rightarrow 15^{\circ} & \text{(pendant 5-7 jours)} \end{cases}$

Fig. N° 1.

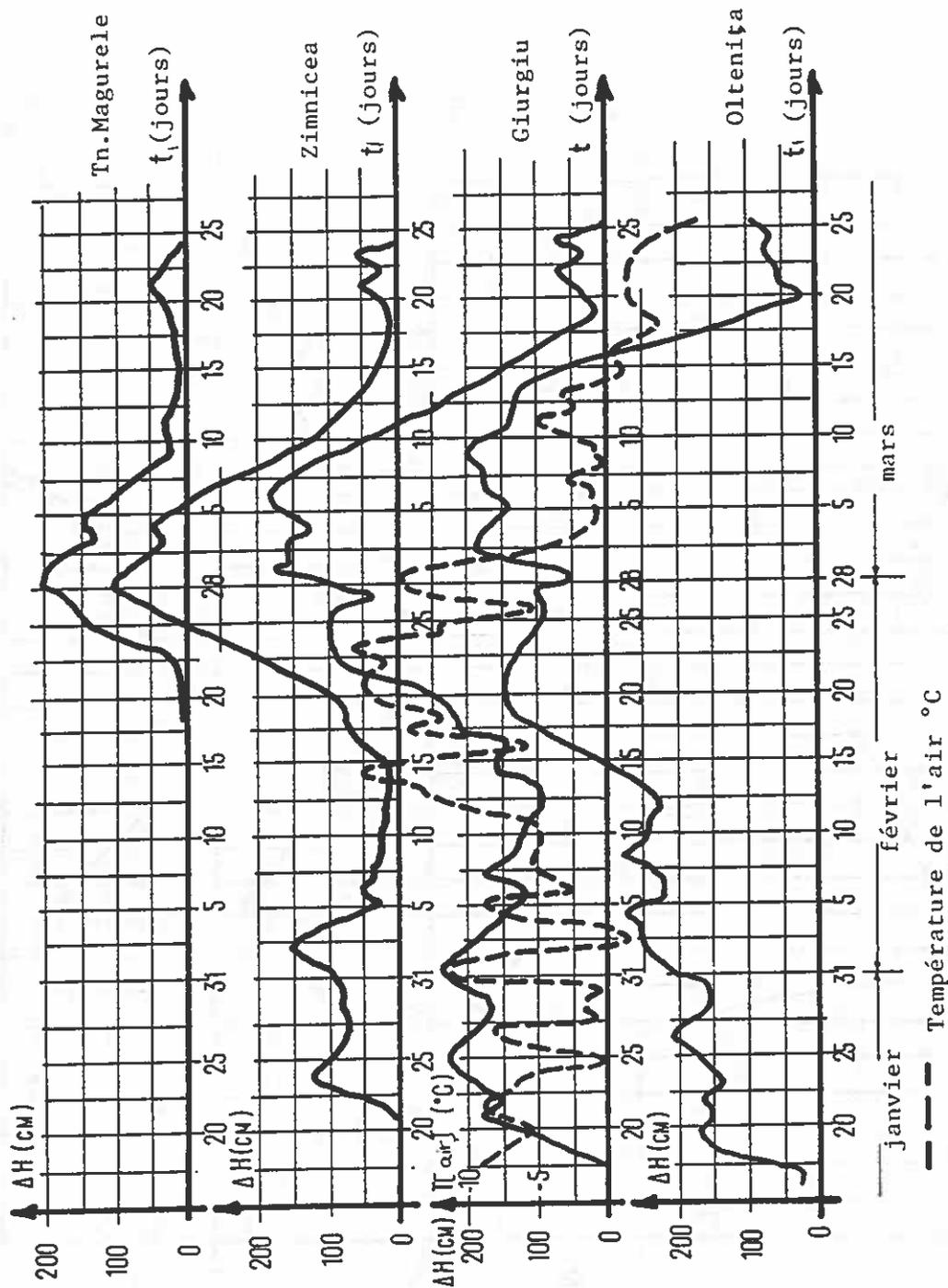


Hausses maxima le long du Danube pendant des hivers caractéristiques

|         |           |                            |
|---------|-----------|----------------------------|
| —       | 1941-1942 | 4300-4000 mc/s             |
| - - -   | 1953-1954 | 1650-2300 mc/s             |
| - · - · | 1962-1968 | 4400-3500 mc/s (mois I,II) |
| - x -   | 1934-1985 | 2800-5000 mc/s             |
| - o -   | 1986-1987 | 3500-5350 mc/s             |

Hausses ( H ) des niveaux pendant l'hiver 1985

Fig. No. 2



Hausses ( H ) des niveaux pendant l'hiver 1985 Fig N°. 2 suite

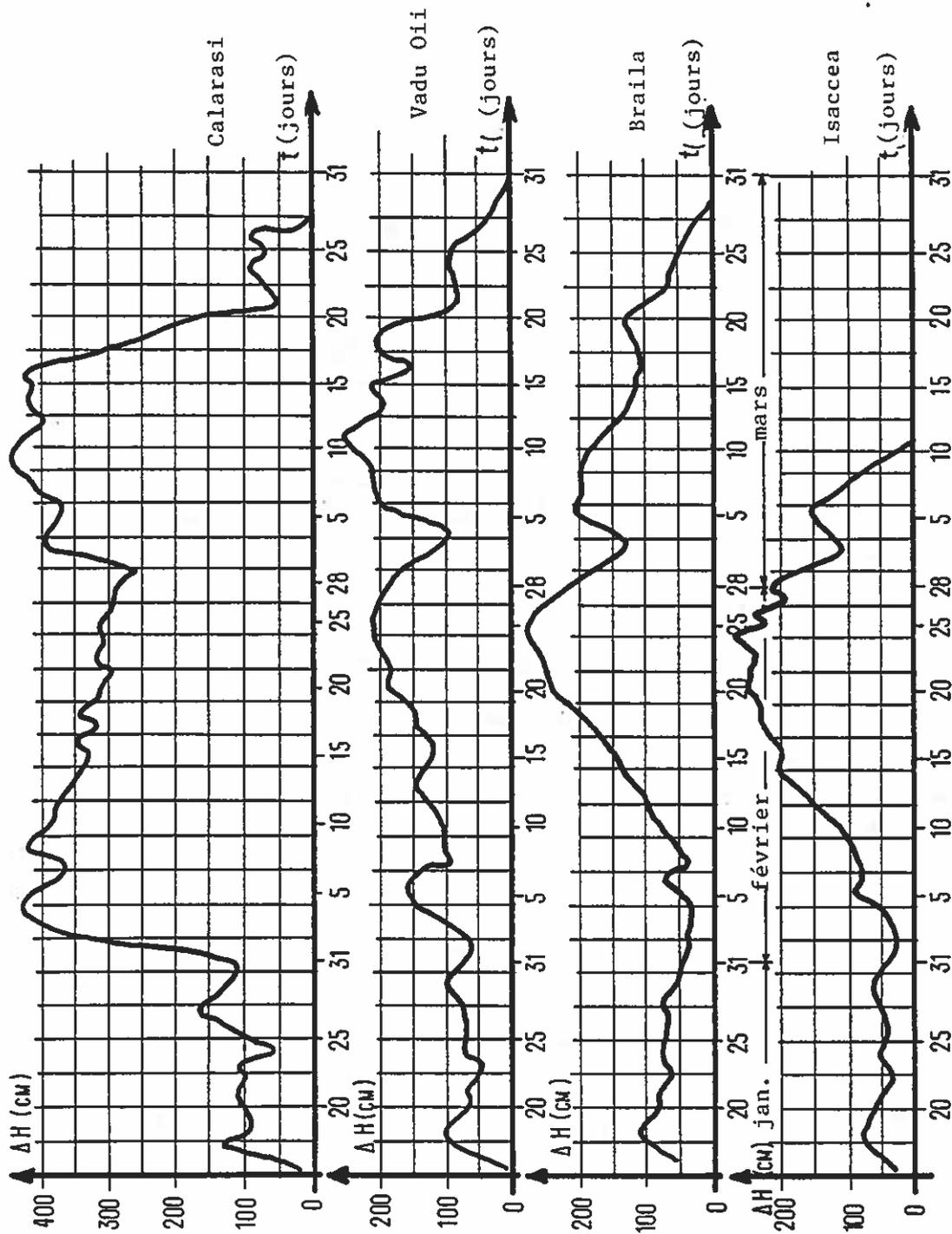
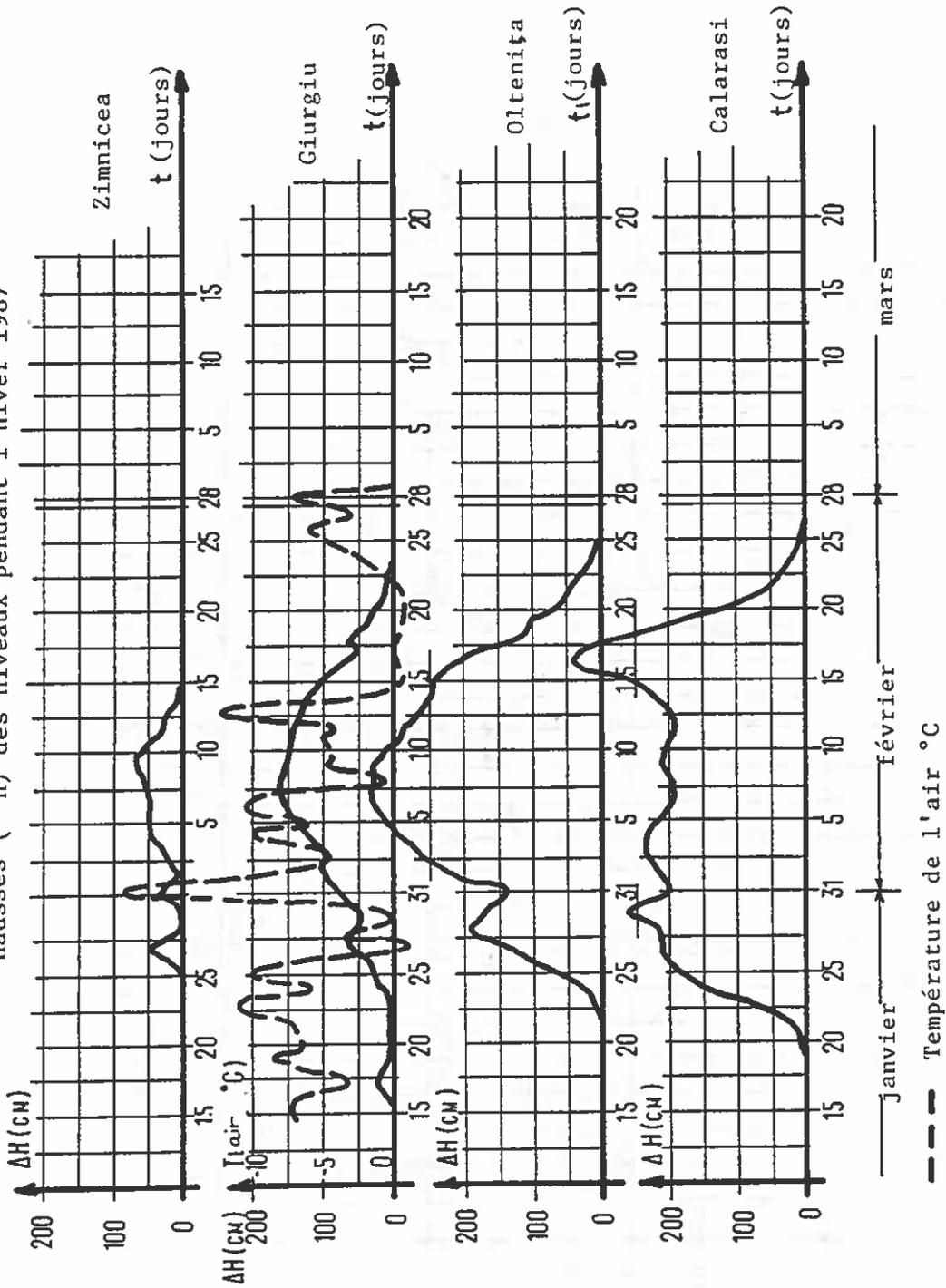


Fig. N° 3

Hausses ( H ) des niveaux pendant l'hiver 1987



Hausses ( H ) des niveaux pendant l'hiver 1987

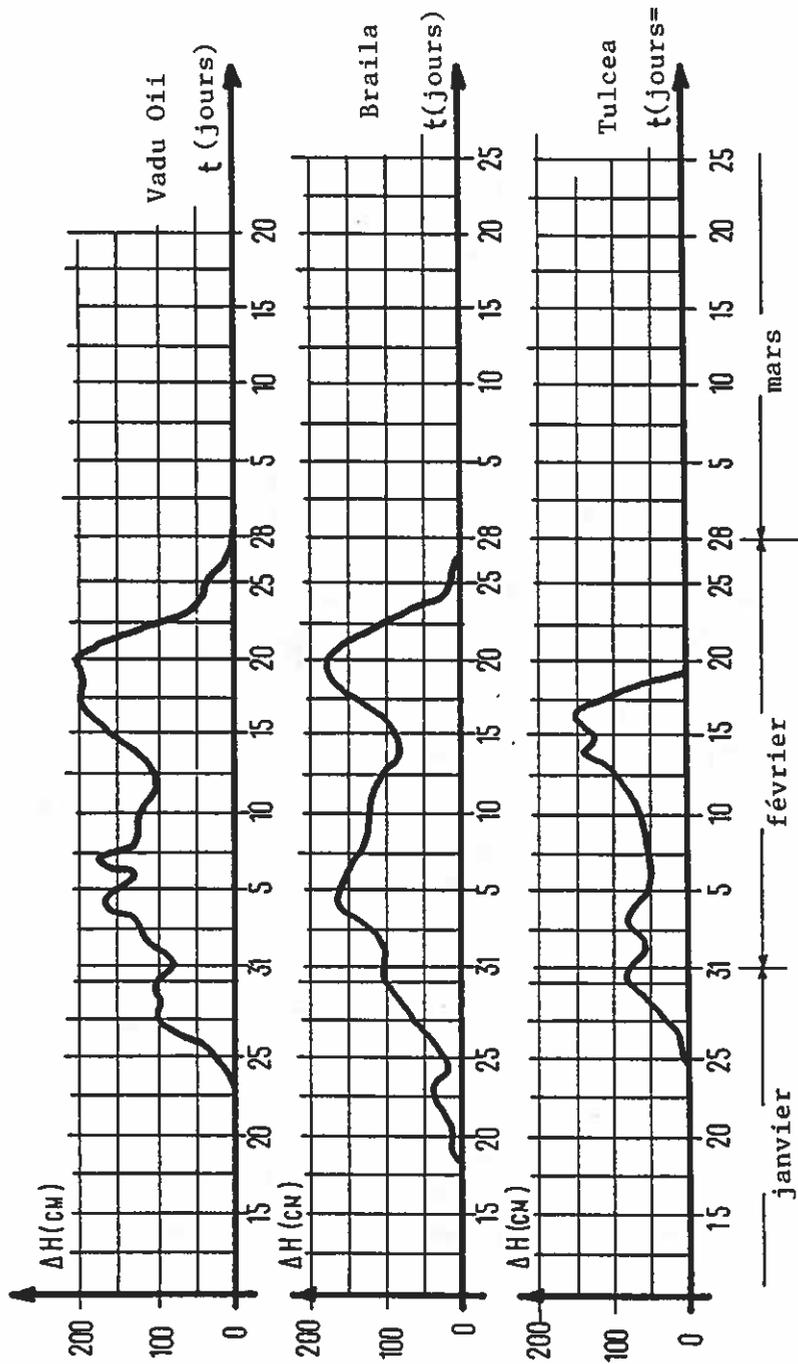
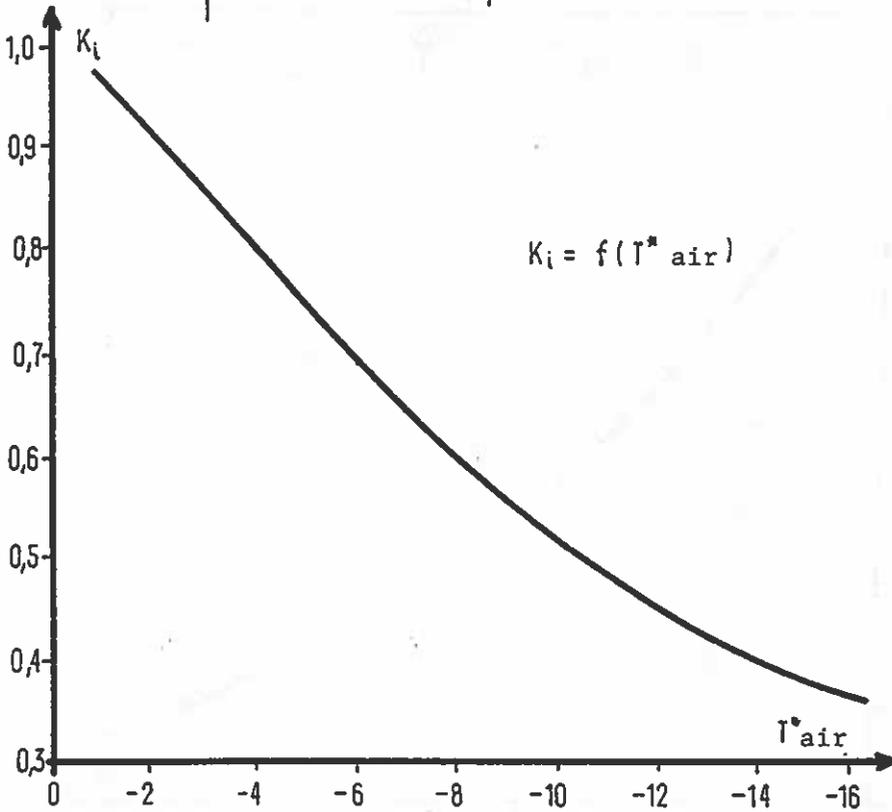
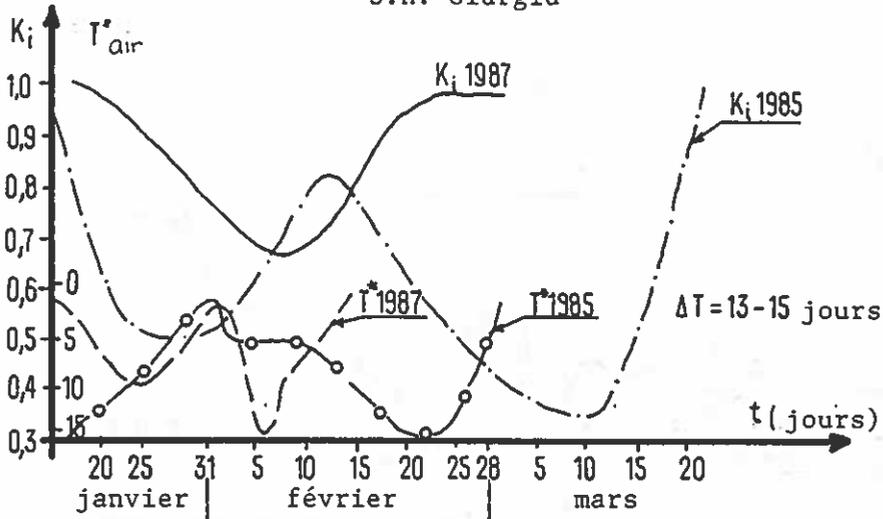


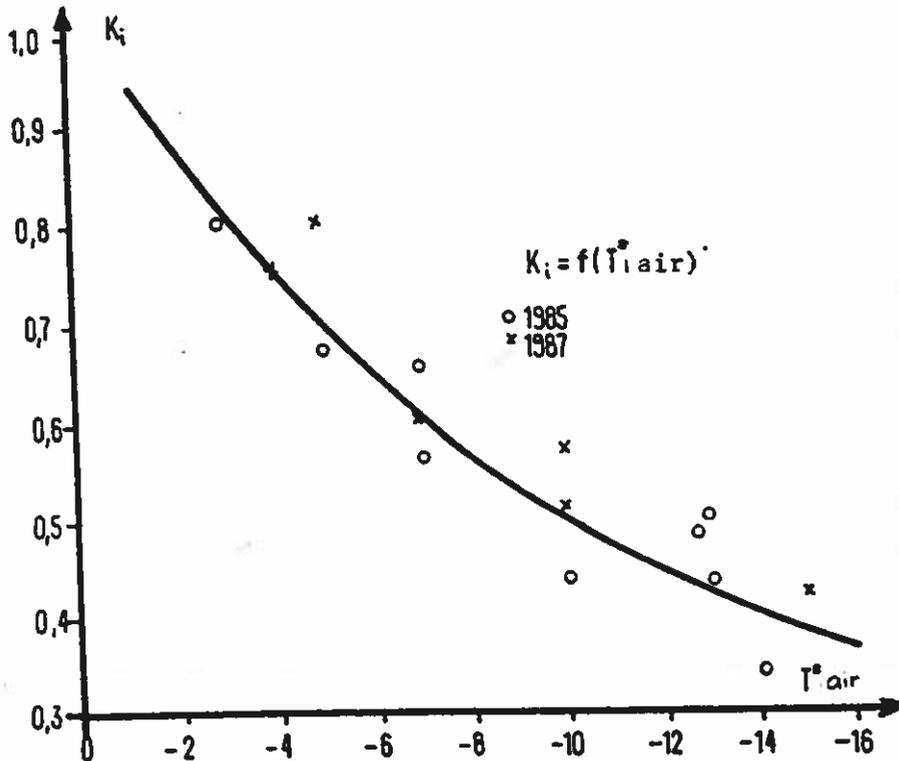
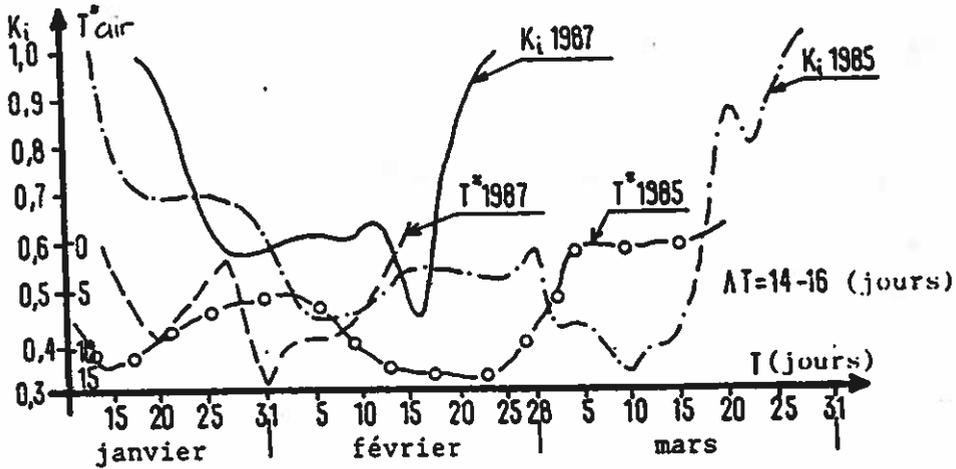
Fig. No. 4

S.H. Giurgiu



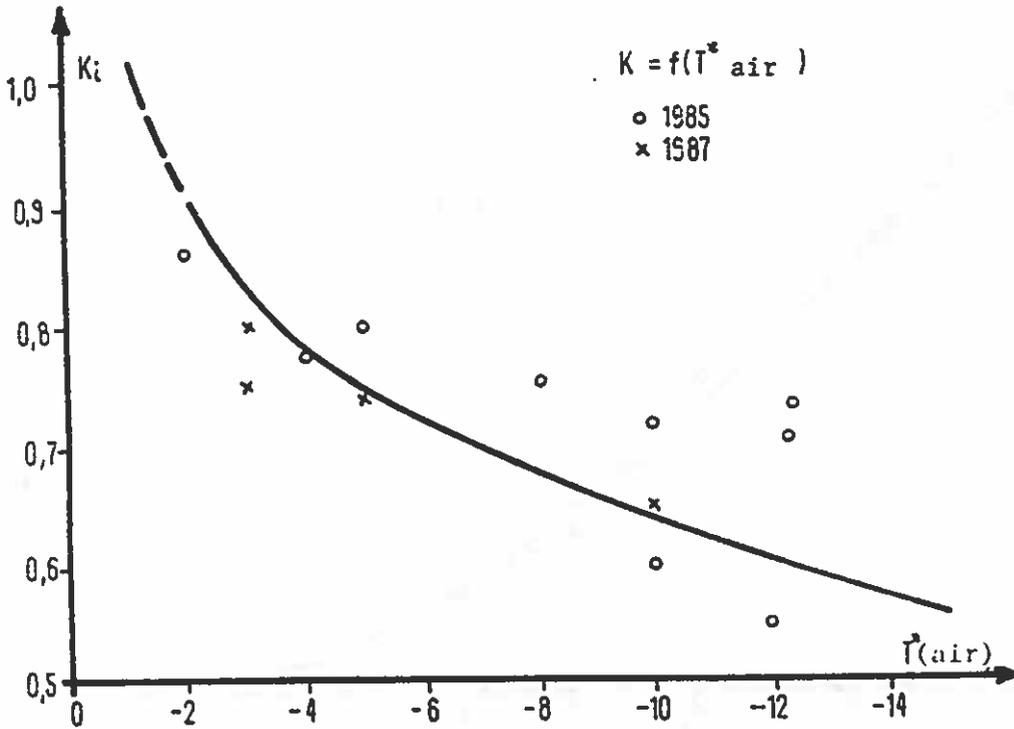
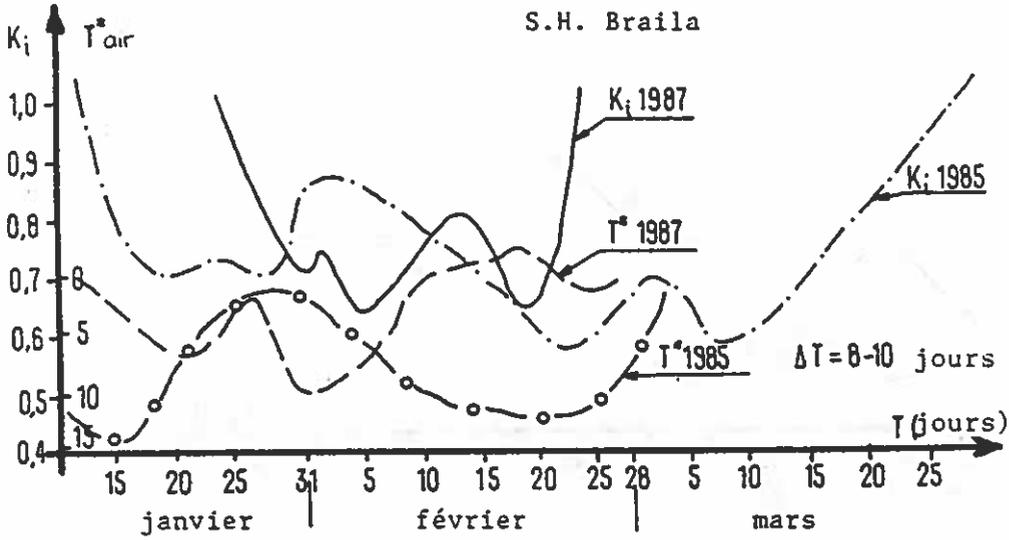
Variation des coefficients de correction  $K_i$  et des températures de l'air pendant les hivers 1985 et 1987

S.H. Calarasi



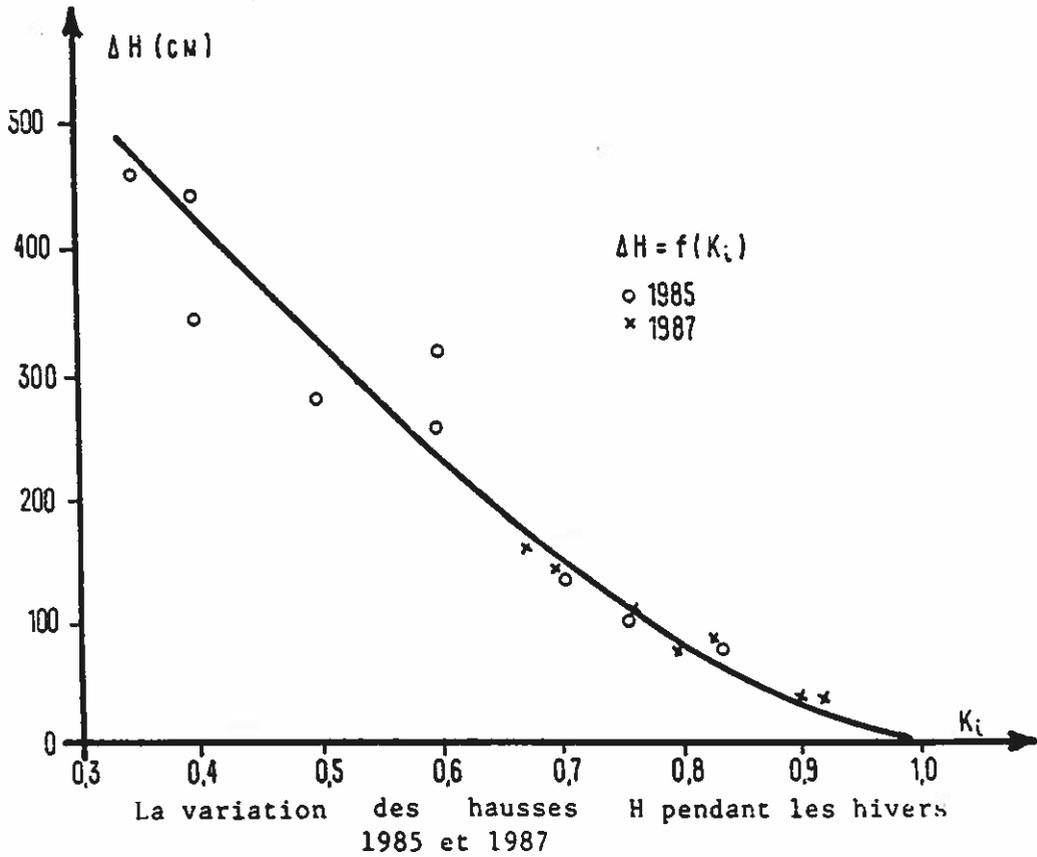
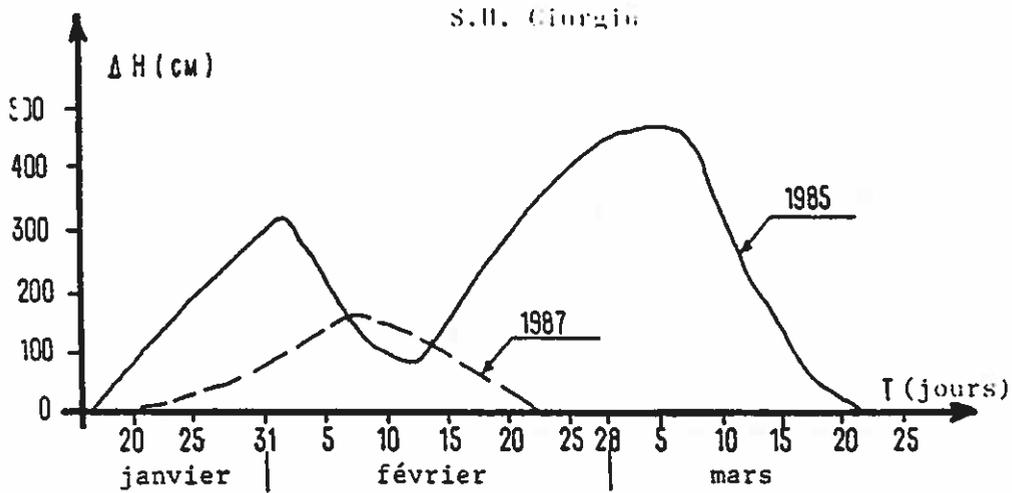
Variation des coefficients de correction  $K_i$  et des températures  $T^*_{air}$  pendant les hivers 1985 et 1987

Fig. N° 6



Variation des coefficients de correction  $K_i$  et des températures de l'air pendant les hivers 1985 et 1987

Fig. N°. 7



S.H. Galarasi

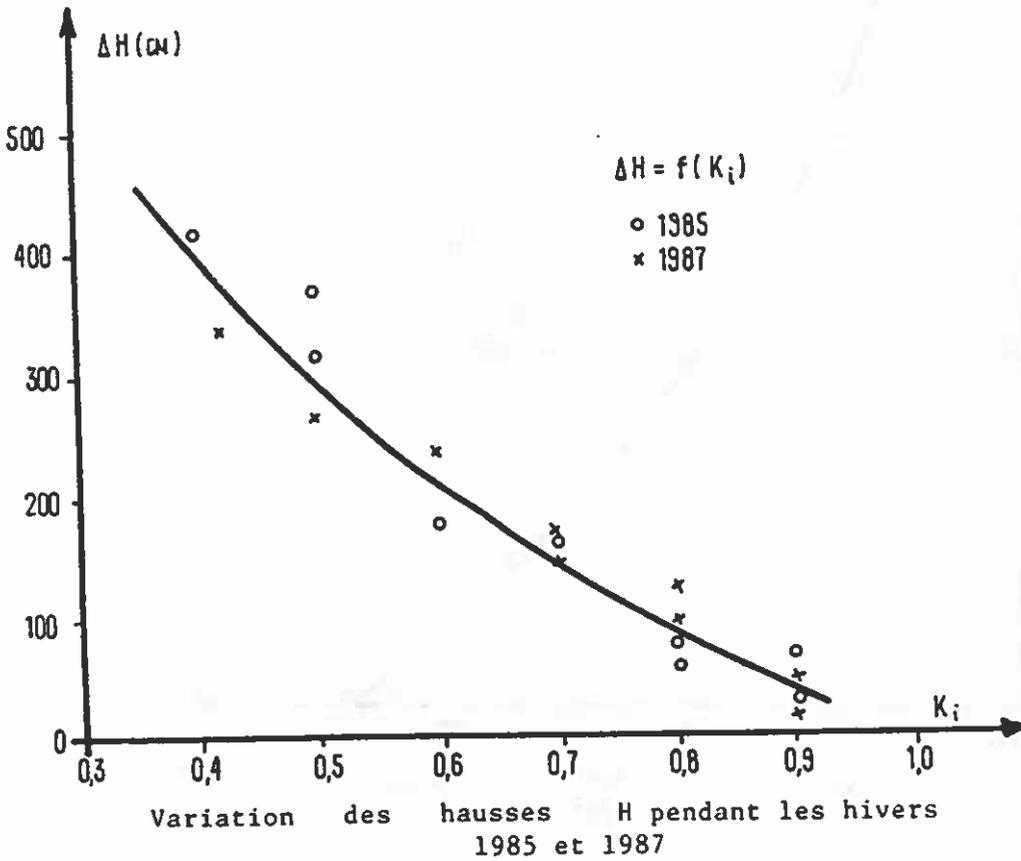
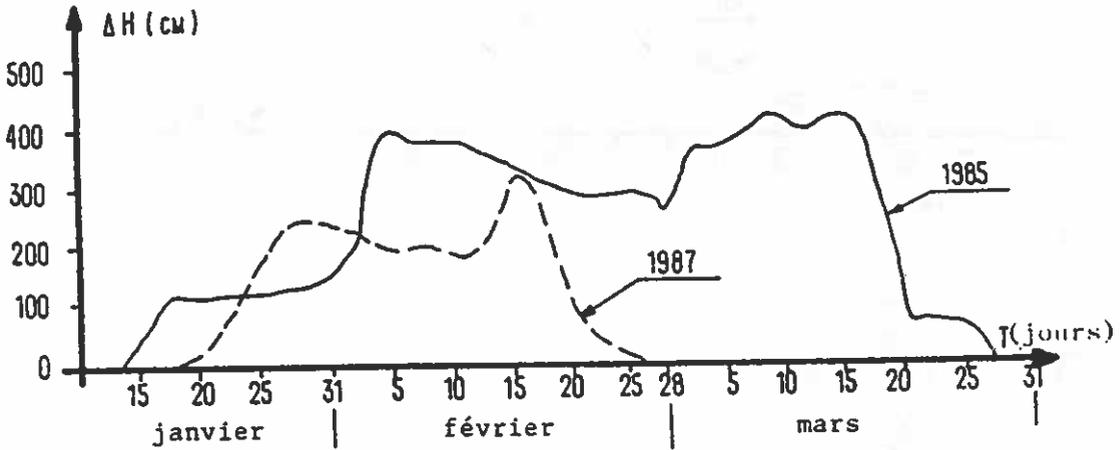
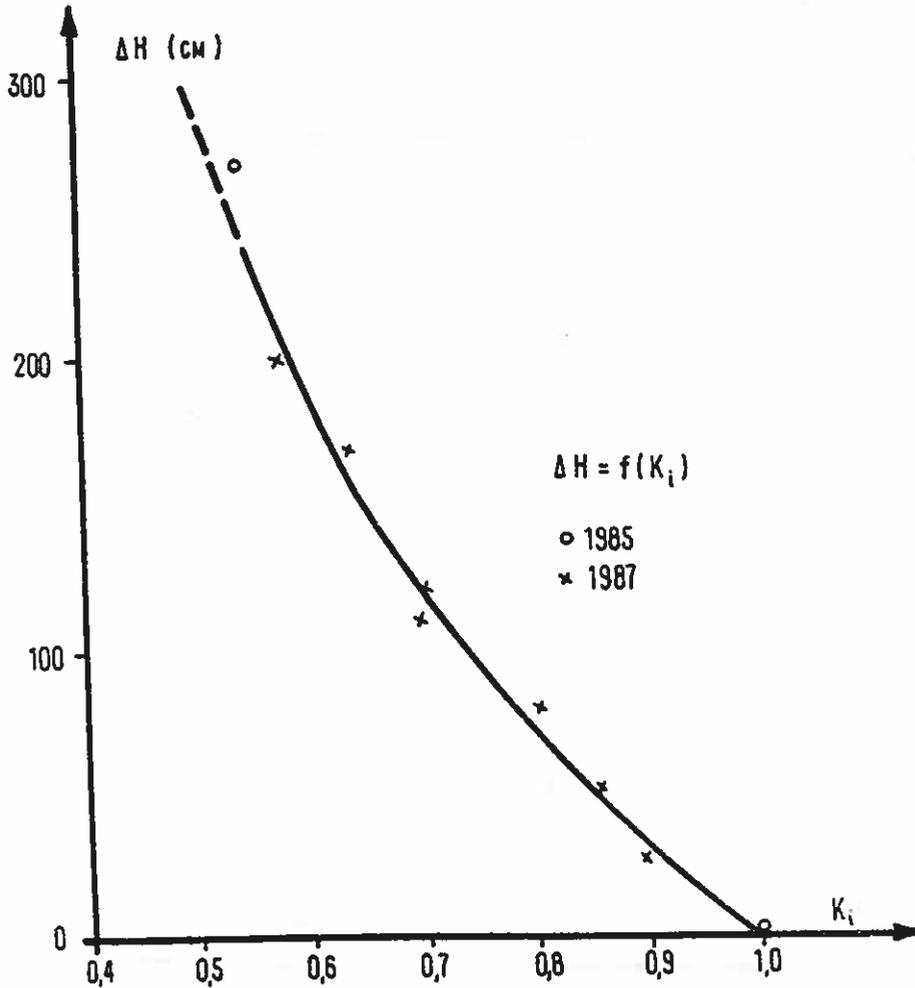
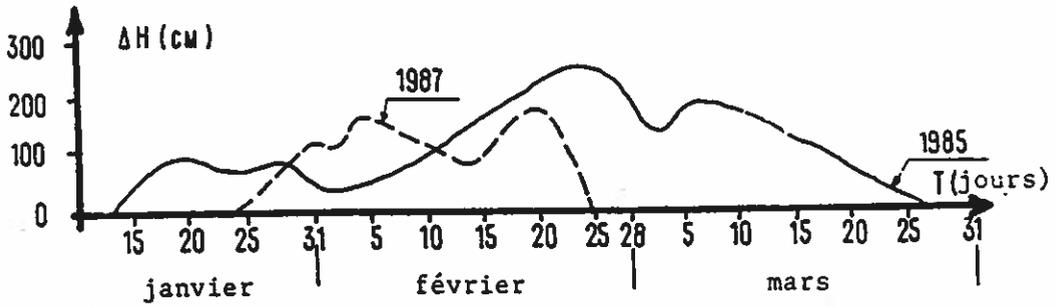


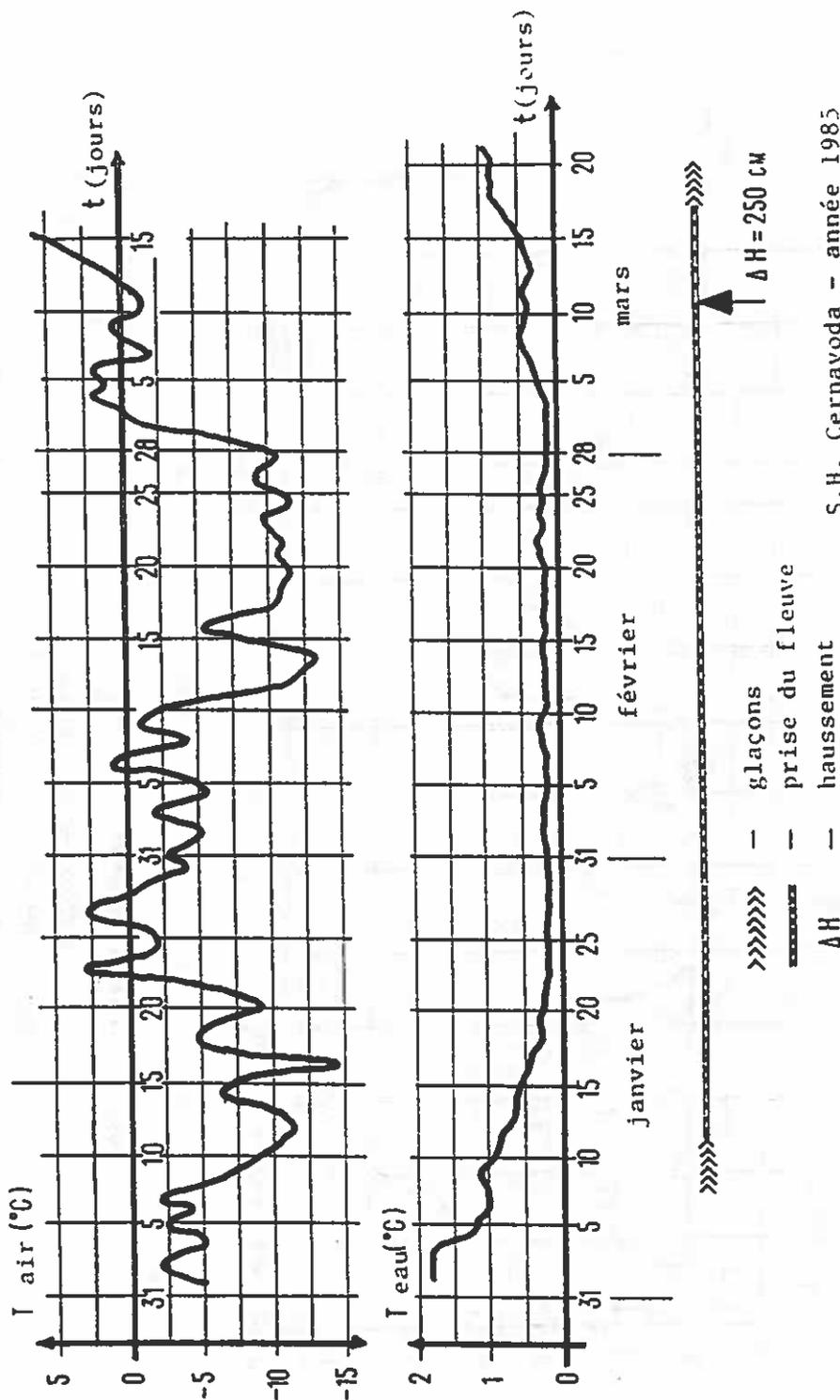
Fig. N°. 9

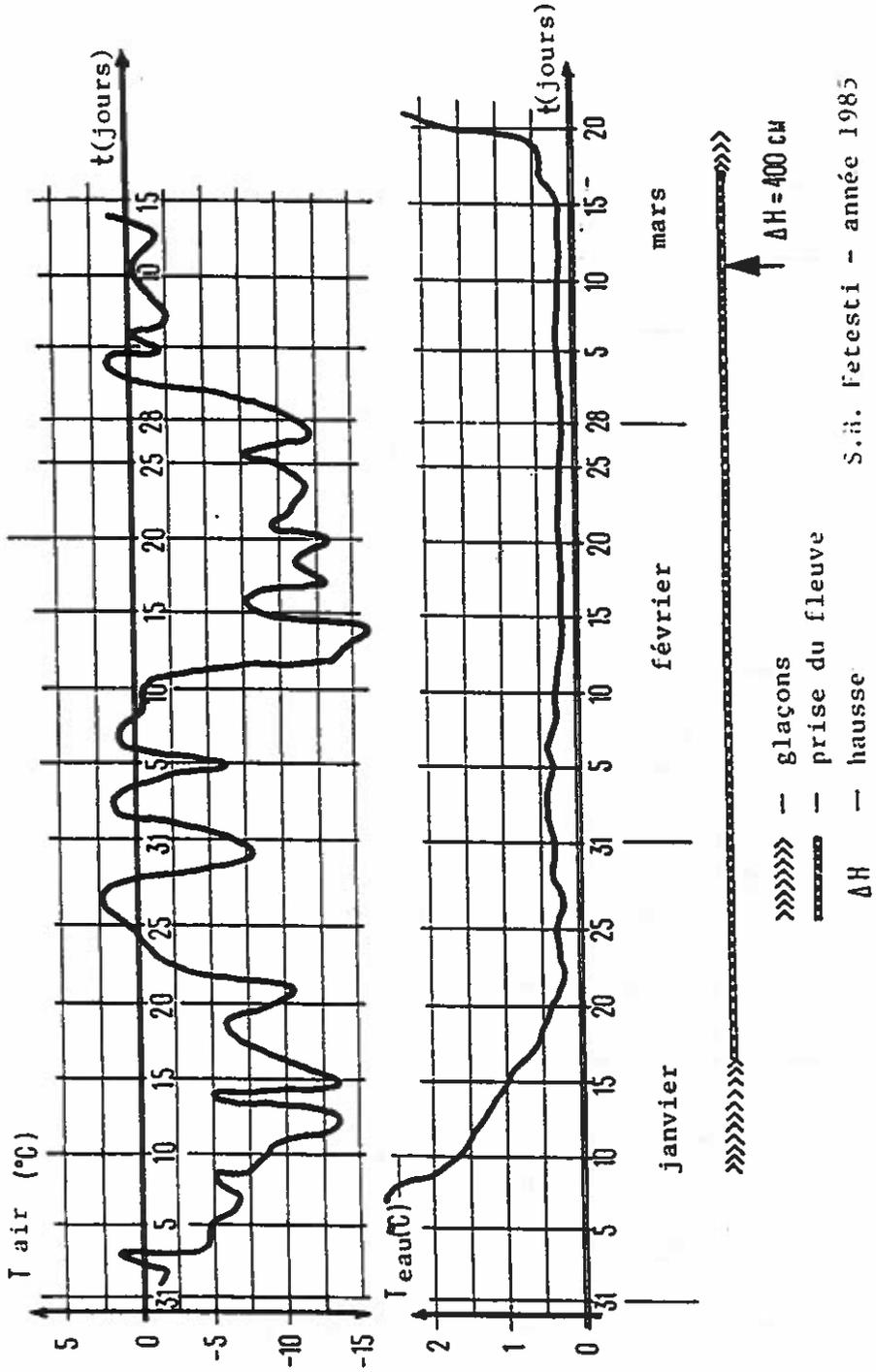
S.H. Braïla



La variation des hausses  $H$  pendant les hivers 1985 et 1987

Fig. No. 10





S.ii. Fetesti - année 1985

#### 4.3.1.8 En Union des Républiques Socialistes Soviétiques

"Méthode de formulation des prévisions à longue échéance de l'apparition des glaces sur le Danube" (Méthode élaborée en 1980, à l'Institut d'hydrologie, par S.V. Schanochkine)

La spécificité du régime des glaces du Danube et en particulier la variabilité des dates de l'apparition des glaces même à des stations proches l'une de l'autre, rend nécessaire, lors de l'analyse statistique et de la formulation des prévisions, d'opérer avec les données des secteurs caractéristiques du fleuve. Le tableau 1 présente les dates fondamentales de l'apparition des glaces sur quatre secteurs à l'état naturel du Danube-Moyen et du Bas-Danube.

Caractéristiques moyennes pluriannuelles du régime des glaces du Danube

| Secteur                    | Date la plus précoce de l'apparition des glaces | Date moyenne pluriannuelle de l'apparition des glaces | Date la plus tardive de l'apparition des glaces | Durée moyenne des phénomènes de glaces (en jours) | Durée maximum des phénomènes de glaces (en jours) |
|----------------------------|---|---|---|---|---|
| Bratislava-Budapest (I)    | 21.XI.  | 1.I   | 10.II.  | 22  | 86  |
| Budapest-<br>Novi-Sad (II) | 24.XI.  | 3.I.  | 10.II.  | 31  | 86  |
| Corabia-<br>Oltenița (III) | 7.XII.  | 4.I.  | 22.II.  | 23  | 86  |
| en aval<br>d'Oltenița      | 8.XII.  | 4.I.  | 23.II.  | 33  | 91  |

Vu le fait que les indications prévisionnelles définitives sont présentées sous forme d'équations de régression multilinéaire, il est nécessaire de donner une présentation numérique de l'information pour toutes les années d'observation, y compris les années où il n'y a pas eu de glaces sur les secteurs donnés. La formulation et la présentation numérique d'une telle situation sont faites pour les considérations suivantes. L'analyse des séries d'observations pluriannuelles a montré que les dates les plus tardives de l'apparition des glaces sur le fleuve sont les 22, 23 février. Ayant en vue que les dates normatives de l'apparition des glaces se situent entre les 1-4 janvier, dans la série temporelle des anomalies dans les dates de l'apparition des glaces, les années sans glace ont reçu le code "+50". Bien que ce chiffre ait, dans une certaine mesure, un caractère conventionnel, son utilisation dans les choix qui précèdent la formation des équations prévisionnelles a toutefois permis d'obtenir des résultats tout à fait satisfaisants.

Le rôle décisif dans l'apparition des glaces sur le Danube revient aux conditions météorologiques et en premier lieu au régime de la température de l'air pendant la période de refroidissement des masses d'eau qui est le résultat des processus atmosphériques se produisant sur de grandes étendues et durant une période prolongée.

La méthode de formulation d'une prévision à longue échéance est fondée sur l'analyse et sur la sommation des informations sur les 10 mois précédant le développement des processus atmosphériques sur tout le territoire de l'hémisphère boréal.

Comme information caractérisant la circulation atmosphérique sur l'hémisphère boréal on a utilisé la sommation des champs des anomalies mensuelles dans la pression et la température de l'air au sol (à 03 h.) de janvier jusqu'à octobre, enregistrées pendant les années 1939-1977. Les champs sont décrits par les valeurs des éléments météorologiques à des points concrets (70  $\Delta p$  et 40  $\Delta t$ ).

Le problème du choix des informations prévisionnelles les plus appropriées parmi les données initiales de cette riche archive de données a été résolu en utilisant deux types de compression structurelle et la compression relative. Il va de soi que la valeur de l'information prévisionnelle n'est pas identique tous les mois pour les différentes régions de l'hémisphère boréal, et pour cette raison on a tout d'abord choisi les régions dont les valeurs montrent un caractère dynamique. Ces régions ont été déterminées à l'aide des cartes des isocorrélations conçues spécialement à cette fin. Dans les calculs qui suivirent, les informations concernant lesdites régions étaient représentées par les données des stations dont les coefficients de corrélation avec les dates de l'apparition des glaces sur le Danube étaient les plus élevés. Le tableau 2 donne les noms des stations dont les informations sont utilisées directement (après une analyse appropriée) pour l'obtention des fonctions prévisionnelles.

La deuxième phase de la compression comprend la présentation des informations sur les régions significatives de l'hémisphère, sous forme de caractéristiques quantitatives des processus atmosphériques. Il a été élaboré deux variantes (schémas) de la prévision physico-statistique, dans lesquelles le système initial des tests-pré-

dicateurs est obtenu au moyen de la compression structurelle et relative, respectivement.

Dans la première variante (schéma) on a appliqué l'analyse des composantes (méthode de la décomposition en composantes orthogonales naturelles).

L'information météorologique initiale peut être représentée par la matrice

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2m} \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Sur la base de la matrice (1) on calcule la matrice de corovariance R

$$R = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1m} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2m} \\ \mu_{m1} & \mu_{m2} & \dots & \mu_{mm} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mu_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (f_{ki} - \bar{f}_i)(f_{kj} - \bar{f}_j) \quad (3)$$

La solution ultérieure de l'entier problème posé par la matrice R se trouve dans les vecteurs propres U

$$(R - \lambda E)U = 0 \quad (4)$$

où E - matrice-unité, U - vecteurs propres,  $\lambda$  - valeurs propres de la matrice R.

Le système des vecteurs propres devient orthogonal et normatif, c'est pourquoi les valeurs des coefficients de décomposition sont calculées selon la formule

$$K_{hi} = \sum_{k=1}^m U_{hk} \cdot f_{ik} \quad (5)$$

Dans le schéma des prévisions les coefficients  $K_{hi}$  sont traités en tant que tests-prédicteurs.

L'exactitude de la présentation des champs (vitesse de la convergence de décomposition) pour un nombre (h) de composantes naturelles, est évaluée à l'aide de la formule

$$d = \frac{\sum_{h=1}^h \lambda h}{\sum_{h=1}^m \lambda h} \cdot 100\% \quad (6)$$

Tableau 2

Stations dont les données sont utilisées pour la formulation des prévisions selon l'équation II

| N°<br>d'ordre | P r e s s i o n   |                |                              |                                    |
|---------------|-------------------|----------------|------------------------------|------------------------------------|
|               | mars              | avril          | juin                         | octobre                            |
| 1.            | Barrow            | Angmagsalik    | Coal-Harbor                  | Fairbanks                          |
| 2.            | Aklavik           | Reykjavik      | Coppermine                   | Kodiak                             |
| 3.            | Coppermine        | Lisbonne       | Moose                        | Coal-Harbor                        |
| 4.            | Le Pas            | Vienne         | Chicago                      | Le Pas                             |
| 5.            | I. Nantucket      | Karmakuli      | I. Nantucket                 | Denver                             |
| 6.            | Brest<br>(France) | Arkhangelsk    | Angmagsalik                  | Arctic-Bay                         |
| 7.            | Lisbonne          | Cap Jelania    | Cap Tobi                     | I. Résolution                      |
| 8.            | Vienne            | Salegarde      | Reykjavik                    | Murmansk                           |
| 9.            | Rome              | Khatanga       | 50° la.N, 20°<br>Lo.S        | Salegarde                          |
| 10.           | Athènes           | Tura           | Brest<br>(France)            | Kazalinsk                          |
| 11.           | Arkhangelsk       | Irkutsk        | Kiev                         | Omsk                               |
| 12.           | Kazany            | Tiksi          | Volgograd                    | Kyzyl                              |
| 13.           | Orenburg          | Iakutsk        | Omsk                         | Aleksan-<br>drovsk-Saha-<br>linsky |
| 14.           | Kazalinsk         | I. Kotelnoï    | Iakutsk                      | 40° La, N,<br>140° Lo. E.          |
| 15.           | Omsk              | Iles Andreanov | Aleksandrovsk-<br>Sahalinsky | Dutch-<br>Harbor                   |

Dans la deuxième variante (schéma) a été employée l'analyse discriminante. L'algorithme de la solution du problème se résume en ce qui suit:

On formule la sommation des données météorologiques

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2m} \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nm} \end{pmatrix}$$

Il est connu (conformément à la règle de graduation des prédicateurs) qu'une partie des secteurs appartient à la classe A, une autre partie à la classe B, tandis que l'appartenance d'une certaine partie des vecteurs n'est pas définie. Le nombre des vecteurs de la classe A est égale à  $n_A$  et de la classe B à  $n_B$

Ainsi,

$$n_A + n_B \leq n.$$

La matrice de covariance R est calculée au moyen de la sommation de tous les vecteurs classés.

$$R = \begin{pmatrix} \mathcal{U}_{11} & \mathcal{U}_{12} & \dots & \mathcal{U}_{1m} \\ \mathcal{U}_{21} & \mathcal{U}_{22} & \dots & \mathcal{U}_{2m} \\ \mathcal{U}_{m1} & \mathcal{U}_{m2} & \dots & \mathcal{U}_{mm} \end{pmatrix}$$

$$\text{où } \mathcal{U}_{ij} = \frac{1}{n_A + n_B} \sum_{k=1}^{n_A + n_B} (f_{ki} - \bar{f}_i)(f_{kj} - \bar{f}_j)$$

Partant de la sommation des vecteurs appartenant aux classes A et B, on forme la matrice de covariance entre les classes R\*

$$R^* = \begin{pmatrix} \mathcal{U}_{11}^* & \mathcal{U}_{12}^* & \dots & \mathcal{U}_{1m}^* \\ \mathcal{U}_{21}^* & \mathcal{U}_{22}^* & \dots & \mathcal{U}_{2m}^* \\ \mathcal{U}_{m1}^* & \mathcal{U}_{m2}^* & \dots & \mathcal{U}_{mm}^* \end{pmatrix} \quad (7)$$

ici

$$\mathcal{U}_{ij}^* = f_i(A) f_j(A) + f_i(B) f_j(B) - f_i(A) f_j(B) - f_j(A) f_i(B), \quad (8)$$

où  $f_i(A)$  -ème composante du vecteur appartenant à la classe A

$f_j(B)$  -ème composante du vecteur appartenant à la classe B

Après le calcul des matrices R et R\* l'équation suivante est résolue

$$(R^* - \lambda R)U = 0 \quad (9)$$

c'est-à-dire on obtient les valeurs propres et les vecteurs principaux U. Ils sont placés dans l'ordre de diminution (selon le module) des nombres finis. Le coefficient  $Z_{1k}$  calculé sur la base des valeurs de la première composante est utilisé en tant que prédicteur.

$$Z_{1k} = \sum_{i=1}^m U_{1i} f_{ki} \quad , \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

Dans le premier schéma, le système des tests-prédicteurs était composé de cent membres (à raison de 5 coefficients de décomposition par mois et par élément météorologique), et dans la deuxième il y en avait vingt.

L'optimisation de la composition des prédicteurs entrant dans les équations prévisionnelles a été réalisée à l'aide des coefficients de l'information prévisionnelle (CIP). Si, avec la majoration du nombre des variables, la valeur du coefficient ordinaire de corrélation multiple augmente, le CIP n'augmente que jusqu'à un certain moment, puis, après l'addition du prédicteur suivant, il diminue. La valeur maximum de CIP montre que la composition des prédicteurs est optimale et qu'il peut avec un degré de fiabilité défini servir à évaluer l'efficacité de l'utilisation des équations, dans des conditions proches de la pratique, pour l'émission des prévisions opérationnelles.

L'évaluation des fonctions prévisionnelles a été effectuée en conformité avec l'Instruction en vigueur.

En résultat du choix de l'ensemble optimal des prédicteurs pour la prévision à long terme de l'apparition des glaces sur le Danube (schéma I) l'équation suivante a été posée

$$\Delta D = A_0 + A_1 K_{1p}^{III} + A_2 K_{2p}^{IV} + A_3 K_{3p}^{IV} + A_4 K_{4p}^{VI} + A_5 K_{1p}^X \quad (11)$$

où  $\Delta D$  écart prévu dans les dates de l'apparition des glaces par rapport aux normes - en jours;

$A_0$  membre libre de l'équation;

$A_1 - A_5$  coefficients de l'équation de régression;

$K_{1p}^{III}, K_{2p}^{IV}, K_{3p}^{IV}, K_{4p}^{VI}, K_{1p}^X$  - coefficients de décomposition des champs d'anomalies dans la pression atmosphérique au sol, pour mars, avril, juin et octobre.

Les indices inférieurs indiquent le numéro du coefficient de décomposition. Le Tableau 3 présente les valeurs des vecteurs propres de la décomposition des champs correspondants des anomalies de pression au sol. Les coefficients de l'équation de régression (11) et l'évaluation de leur valeur prévisionnelle pour les secteurs caractéristiques du Danube sont donnés dans le Tableau 4. L'équation posée sur la base des prédicteurs obtenus en résultat de l'analyse discriminante (schéma II) est formée comme suit:

$$\Delta D = A_0 + A_1 Z_p^{III} + A_2 Z_p^{IV} + A_3 Z_p^{VI} + A_4 Z_p^X + A_5 Z_t^{III} \quad , \quad (12)$$

où  $Z_p^{\text{III}}, Z_p^{\text{IV}}, Z_p^{\text{V}}, Z_p^{\text{X}}$  - prédicteurs par champs de pression, pour mars, avril, juin et octobre:

$Z_t^{\text{III}}$  - prédicteur par champ de température de l'air, pour mars.

Les noms des stations dont les informations sont utilisées pour l'obtention des premiers vecteurs propres U (Tableau 6) figurent dans le Tableau 5.

Les coefficients de l'équation (12) et l'évaluation de leurs valeurs prévisionnelles pour les différents secteurs du Danube sont présentés dans le Tableau 7.

Dans le cas des fonctions (11) et (12) l'échéance moyenne des prévisions atteint deux mois.

L'appréciation de l'utilisation des méthodes élaborées (Tableaux 4 et 7) montre que ces méthodes sont pleinement acceptables et satisfont entièrement les exigences de l'Instruction pertinente.

Tableau 3

Vecteurs propres des anomalies de la pression  $X_p$  et de la température de l'air  $X_t$  (schéma I)

| N°<br>d'ordre | $X_{1p}^{III}$ | $X_{2p}^{IV}$ | $X_{3p}^{IV}$ | $X_{4p}^{VI}$ | $X_{1p}^X$ |
|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|------------|
| 1             | 0,3866         | -0,0040       | -0,3021       | -0,3887       | 0,3981     |
| 2             | 0,1842         | -0,3246       | 0,2205        | 0,5650        | 0,4486     |
| 3             | -0,2528        | 0,0029        | -0,0482       | 0,1078        | 0,2412     |
| 4             | 0,0686         | 0,0380        | 0,3648        | 0,1209        | 0,4898     |
| 5             | -0,2707        | 0,5382        | 0,0606        | 0,0578        | 0,1260     |
| 6             | 0,3186         | 0,5503        | 0,3432        | 0,2514        | 0,2902     |
| 7             | -0,1400        | 0,1068        | 0,1987        | -0,0872       | 0,3890     |
| 8             | -0,2802        | -0,1802       | -0,0685       | -0,0841       | -0,0484    |
| 9             | 0,2689         | -0,2247       | 0,5585        | 0,1452        | 0,2426     |
| 10            | -0,1400        | -0,1780       | -0,1094       | 0,4980        | 0,1517     |
| 11            | -0,3181        | -0,0506       | -0,0202       | -0,0273       | 0,0698     |
| 12            | 0,3182         | -0,0854       | -0,2151       | 0,1378        | -0,1008    |
| 13            | -0,2168        | -0,2622       | -0,2783       | -0,0799       | -0,0240    |
| 14            | -0,2255        | -0,0798       | -0,1658       | -0,2132       | 0,0592     |
| 15            | -0,3042        | 0,3406        | 0,3802        | -0,2891       | -0,1010    |

Tableau 4

Coefficients de l'équation (11) et évaluation de sa valeur prévisionnelle pour les différents secteurs du Danube

| Secteur                 | $A_0$ | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ | $A_5$ | $0,6746 R$ | $K_{pi}$ | $\frac{S}{\sigma}$ | $P_{mp}$ | $P_M$ |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|----------|--------------------|----------|-------|
| Bratislava-Budapest (I) | 9,05  | -0,34 | -1,10 | -2,02 | -1,71 | 0,46  | 16,2       | 0,82     | 0,77               | 0,58     | 56 80 |
| Budapest, Novi Sad (II) | 5,01  | -0,47 | -0,72 | -2,31 | -1,33 | 0,08  | 16,4       | 0,82     | 0,73               | 0,55     | 55 90 |
| Corabia-Oltenița (III)  | 14,10 | -0,44 | -1,27 | -0,80 | -1,79 | 1,28  | 17,2       | 0,86     | 0,81               | 0,50     | 53 85 |
| en aval d'Oltenița      | 12,47 | -0,39 | -1,29 | 0,65  | -1,63 | 1,20  | 16,2       | 0,85     | 0,77               | 0,54     | 53 90 |

Tableau 5

Stations dont les données sont utilisées pour  
la prévision selon l'équation (12)

| N°<br>d'ordre | Pression    |                   |             | Température       |                   |
|---------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------------|
|               | mars        | avril             | juin        | octobre           | mars              |
| 1             | Coppermine  | Reykjavik         | Coppermine  | Fairbanks         | Krasnoyarsk       |
| 2             | I.Nantucket | Cap Jelania       | Chicago     | Cadillac          | Spokane           |
| 3             | Lisbonne    | Salegarde         | I.Nantucket | Arctic-Bay        | Denver            |
| 4             | Rome        | Katanga           | Angmagsalik | I.Résolu-<br>tion | Winnipeg          |
| 5             | Athènes     | Irkutsk           | Reykjavik   | Mourmansk         | Chicago           |
| 6             | Kazany      | Iakutsk           | Kiev        | Salegarde         | Moussoni          |
| 7             | Orenburg    | Iles<br>Andreanov | Volgograd   | Dutch-<br>Harbor  | I.Santa-<br>Maria |

Premiers vecteurs propres des anomalies de pression  
 $U_p$  et de température de l'air  $U_t$  (schéma II)

| N°<br>d'ordre | $U_p^{III}$ | $U_p^{IV}$ | $U_p^{VI}$ | $U_p^X$ | $U_t^{III}$ |
|---------------|-------------|------------|------------|---------|-------------|
| 1             | 0,0597      | -0,0093    | 0,0362     | 0,3101  | 0,2102      |
| 2             | -0,1010     | -0,0282    | -0,1599    | -0,0882 | 0,1295      |
| 3             | 0,0542      | 0,0278     | -0,2424    | -0,0155 | -0,0914     |
| 4             | 0,2891      | 0,1000     | 0,3402     | -0,0105 | 0,3815      |
| 5             | -0,0265     | -0,2092    | 0,2309     | -0,0092 | -0,2648     |
| 6             | -0,4170     | 0,2496     | 0,1101     | 0,0791  | 0,2523      |
| 7             | -0,0702     | -0,1582    | 0,1022     | 0,0307  | 0,1023      |

Tableau 7

Coefficients de l'équation (12) et évaluation de sa valeur  
prévisionnelle pour les différents secteurs du Danube

| Secteur                        | A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> | A <sub>4</sub> | A <sub>5</sub> | Q <sub>1974</sub> | R    | K <sub>pi</sub> | $\frac{S}{\phi}$ | P <sub>op</sub> | P <sub>M</sub> |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|
| Bratislava-<br>Budapest<br>(I) | 9,06           | -3,23          | -12,05         | 3,02           | 4,62           | -3,38          | 16,2              | 0,83 | 0,73            | 0,57             | 56              | 82             |
| Budapest-<br>Novi Sad<br>(II)  | 7,04           | -5,24          | -9,88          | 2,69           | 4,03           | -2,00          | 16,4              | 0,81 | 0,71            | 0,56             | 60              | 82             |
| Novi Sad<br>Oltenița<br>(III)  | 7,14           | -2,90          | -10,51         | 6,64           | 7,34           | -3,50          | 17,2              | 0,87 | 0,80            | 0,51             | 53              | 90             |
| en aval<br>d'Oltenița<br>(IV)  | 5,09           | -4,14          | -8,93          | 7,02           | 6,08           | -1,76          | 16,2              | 0,86 | 0,78            | 0,52             | 53              | 88             |

## Technique de la formulation des prévisions

### Schéma I

Pour l'obtention des coefficients K entrant dans l'équation prévisionnelle (11), il y a la somme (5) des produits des anomalies de pression mesurées aux points indiqués dans le tableau 2 pour les valeurs correspondantes des éléments des vecteurs propres (tableau 3). Les coefficients de l'équation de régression nécessaires pour la formulation de la prévision  $\Delta D$  sont puisés du tableau 4.

### Schéma II

Les coefficients Z entrant dans la fonction (12), sont donnés comme somme (10) des produits des anomalies de pression et de température de l'air mesurées aux points indiqués au tableau 5, pour les valeurs correspondantes des composantes des premiers vecteurs propres (tableau 6). Les coefficients de l'équation de régression nécessaires pour la formulation de la prévision  $\Delta D$ , sont puisés du tableau 7.

Information sur la méthode de prévision à long terme de la date de l'apparition des glaces sur le Danube, Solopenko L.I., Chmatalioug L.N., Chtcherbak A.V. (URSS)

Dans les conditions d'un régime de glaces instable sur le Danube, il importe de connaître en temps voulu le caractère probable de l'évolution de la formation des glaces dans la saison automne-hiver à venir. Sous la direction générale de A.V. Chtcherbak, l'Institut de recherches scien-

tifiques régional d'Ukraine du Comité d'Etat d'hydrométéorologie de l'URSS, s'est occupé de la solution de cette tâche lors de l'élaboration des méthodes de prévision de l'apparition des glaces sur le secteur soviétique du Danube (1969-1970) et sur le secteur en aval de Devin (km 1977-1978); l'analyse de la synoptique des conditions de circulation dans la formation des glaces et l'utilisation de leur indice quantitatif pour l'élaboration de la méthode de prévision à long terme du développement des processus de formation des glaces a été réalisée par L.I. Solopenko et L.N. Chmatalioug.

Essence de la méthode. Les processus synoptiques locaux provoquant une baisse de température dans la région considérée dépendant des processus macrocirculatoires dans l'atmosphère. L'étude de la relation entre les processus qui se déroulent à petite et à grande échelles permet d'établir certaines régularités dans leur développement.

L'analyse a été fondée sur les matériaux de l'archive aéro-synoptique et sur le catalogue des processus macrosynoptiques établi selon la classification de A.L. Katz pour 1938-1974 ainsi que sur les données des observations météorologiques dans le bassin du Danube.

Afin d'obtenir des caractéristiques quantitatives des macroprocessus de la circulation atmosphérique, on a utilisé dans l'étude actuelle la classification fondée sur les indices de circulation, proposée par A.L. Katz. Pour la caractéristique de l'action commune des composantes zonales et méridionales du processus de circulation, on a eu recours à l'indice commun indéfini qui représente la relation entre l'indice méridional et l'indice zonal.

Indiquant le processus zonal par le chiffre "1" et le processus méridional par le chiffre "2", Katz a fait ressortir 4 états probables de la circulation générale de l'atmosphère:

- "11" - processus zonaux dans toute la zone
- "22" - processus méridionaux dans toute la zone
- "12" - dans toute la zone, processus zonal en moyenne, mais dans la partie septentrionale, processus méridional
- "21" - dans toute la zone, processus méridional en moyenne, mais dans sa moitié septentrionale, processus zonal

Pour chaque état de circulation Katz a désigné 4 formes qui caractérisent la localisation géographique des crêtes et des vallées, à savoir: 3 - la crête est à l'occident par rapport à l'Europe, 4 - la crête se trouve au centre, B - la crête est en position orientale, C - processus mixtes qui sont une combinaison de 3 et de B. C'est sur la base de cette classification qu'a été établi le catalogue des macroprocessus par périodes synoptiques naturelles pour les zones de 35° à 70° de latitude nord et 30° de longitude ouest à 110° de longitude est, utilisés dans l'étude actuelle. Les indices de circulation ont été partiellement repris de la documentation établie pour les travaux opératifs par Hydrometcentre de l'URSS et partiellement calculés d'après la documentation du Bureau météorologique de Kiev. La méthode de calcul des indices est exposée en détail dans l'ouvrage de A.L. Katz intitulé "Variations saisonnières de la circulation générale de l'atmosphère et prévisions à long terme", Hydrométéoizdat, L. 1960, page 270.

Les anomalies de la température de l'air, calculées pour le Danube inférieur (écart de la norme

de 3° et plus pour chaque forme de circulation dans la période octobre-février), indiquent que la baisse de température dans la région considérée est souvent conditionnée par des processus méridionaux; à l'état "22" - par les formes 4, 3 et C de circulation; à l'état "21" - par la forme 3 souvent la baisse de température résulte des processus de la position occidentale de la crête, quand l'état zonal de la circulation est "11", et enfin, rarement la baisse de température se produit auprès des processus atmosphériques de la position de crête orientale, c'est-à-dire de circulation B.

Sur la base de ce qui précède, on peut supposer que l'ensemble des formes de circulation indiquées détermine les conditions météorologiques sous l'influence desquelles apparaissent les phénomènes de glaces dans la région considérée.

Partant de cette supposition a été calculé, pour chaque mois de l'année, l'indice N du complexe des macroprocessus qui représente les différents nombres de cas de processus qui conditionnent, dans la période froide de l'année, les advections d'air chaud et les advections d'air froid. Pour calculer la valeur N on a utilisé l'expression suivante:

$$N = n_{22+11+21+12}^B - (n_{22+11+21}^3 + n_{22}^{4 \cdot C})$$

où n - nombre de jours avec circulation de forme respective auprès de divers états de circulation atmosphérique.

La marche annuelle des valeurs moyennes N par groupes d'années avec différentes dates d'apparition des glaces et sans glaces (figure 11), indique que chaque groupe d'années a un indice N qui lui est inhérent et particulièrement contras-

tant en août-octobre. La période donnée des contrastes août-septembre-octobre dans la marche de l'indice N est utilisée comme indice de prévision pour établir le caractère probable du développement des processus de formation des glaces sur le Bas-Danube.

La marche temporelle des valeurs de l'indice N dans des années prises séparément ne répète pas de manière probante la marche de la valeur moyenne. Toutefois, les indices de la marche temporelle N se relèvent dans les groupes 1 et 3 (années avec apparition précoce et apparition tardive des glaces sur le secteur soviétique du Danube) et sont respectivement de 89 et 80%; dans les groupes 2 et 4 (apparition des glaces à la date normale et années sans phénomènes de glace) ils sont respectivement de 70-75%.

Ainsi, sur la base des indices de marche N de août à octobre, déjà à la fin d'octobre on peut dire avec la probabilité indiquée ci-haut, si dans la saison en cours le commencement de la formation de glaces sera précoce, tardif, proche aux dates normales ou bien n'apparaîtra pas.

La figure 2 présente la marche annuelle de l'indice du complexe des macroprocessus au cours des années avec formation de glaces précoce (1), normale (2) tardive (3) et des années sans phénomènes de glaces (4) pour 5 secteurs du Danube en aval de Devin: I - Bratislava, Gönyü, Komárom, Nagymaros; II- Budapest, Dunaföldvár, Mohács, Novi-Sad; III - Zemun, Smederevo, Turnu Severin; IV - Calafat, Svistov, Giurgiu, Silistra; V - Cernavoda, Hirşova, Brăila, Ismaïl.

Les prévisions de contrôle du commencement de la formation de glaces sur les divers secteurs du Danube sont établies en tenant compte de la

variation des indices d'août à octobre et en faisant appel aux graphiques présentés dans la figure 2. Ces prévisions de contrôle montrent, avec une probabilité de 73-77%, que l'on peut prévoir le caractère du développement des processus de la formation des glaces sur le Danube en aval de Devin. De telles prévisions des dates de l'apparition des glaces, émises à titre d'orientation, peuvent être établies le 1<sup>er</sup> novembre.

Les résultats des recherches poursuivies figurent dans les Oeuvres de УкрНИГМИ 1970, fasc. 97, pages 63-69 et dans les Oeuvres de УкрНИИ Госкомгидрометал980, fasc. 183, pages 70-76.

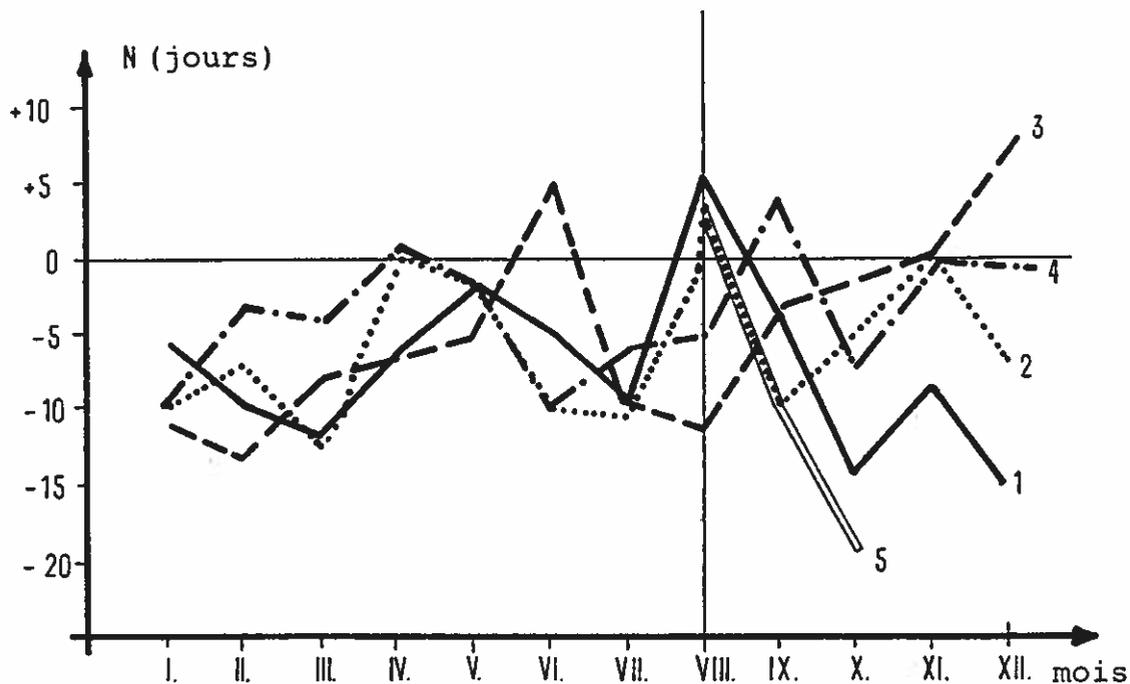


Figure 1 - Marche moyenne annuelle de l'indice par groupe d'années (Ismaïl, 1938-1968)

1. Années du commencement précoce de la formation des glaces (au plus tard le 25.XII.)
2. Années du commencement normal de la formation des glaces (26. XII. - 19.I.)
3. Années du commencement tardif de la formation des glaces (au plus tard le 19.I.)
4. Années où il n'y a pas eu de phénomènes de glaces
5. Saison 1969/1970

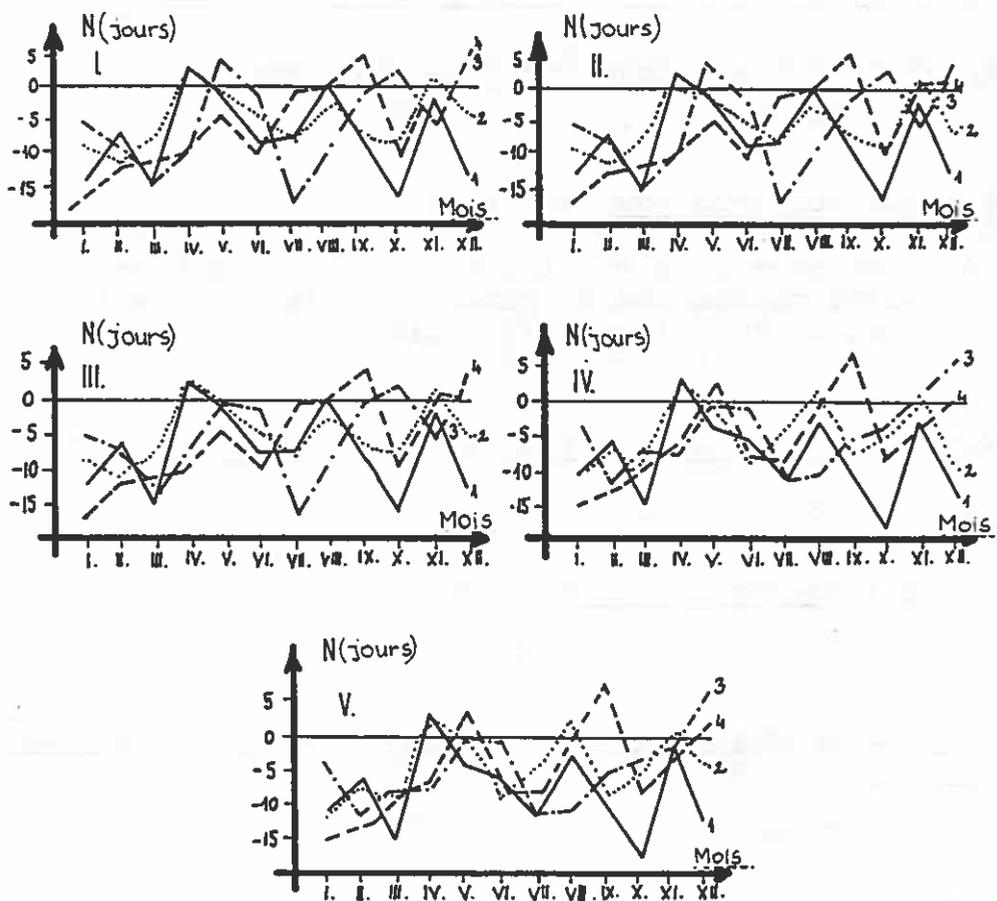


Figure 2 - Marche annuelle de l'indice du complexe des macroprocessus dans les années où le commencement de la formation de glaces a été précoce (1), normal (2), tardif (3) et années sans phénomènes de glaces (4) sur cinq (I-V) secteurs du Danube en aval de Devin.

4.3.2 Méthodes de formulation des prévisions à courte échéance de l'apparition de glaces sur le Danube

4.3.2.1 En République Fédérale d'Allemagne

Voir 4.1.2.1

4.3.2.2 En République d'Autriche

De même, des prévisions à courte échéance sur les phénomènes de glace ne sont pas établies en Autriche. Il y a cependant un service correspondant qui communique des avis à la navigation.

4.3.2.3 En République Fédérative Tchèque et Slovaque

Voir 4.1.1.3

4.3.2.4 En République de Hongrie

Voir 4.3.1.4

4.3.2.5 En République Socialiste Fédérative de Yougoslavie

Voir 4.1.2.5

4.3.2.6 En République de Bulgarie

Le Secrétariat n'a pas reçu de matériaux.

4.3.2.7 En Roumanie

Voir 4.3.1.7

#### 4.3.2.8 En Union des Républiques Socialistes Soviétiques

##### Prévisions à courte échéance de l'apparition de glaces sur le secteur soviétique du Danube Chtcherbak A.V. (URSS)

Le régime des glaces sur le secteur soviétique du Danube se caractérise par une grande instabilité dans le temps; ici la formation de la glace peut commencer à toute période de l'hiver. Dans de telles conditions les prévisions des phénomènes de glaces revêtent une grande importance et, tout particulièrement, les prévisions à courte échéance de l'apparition des glaces.

La méthode de prévision à courte échéance et le schéma de calcul de l'apparition de glaces flottantes sur le Danube inférieur, exposés ci-après, ont été élaborés par l'Institut régional de recherches scientifiques d'Ukraine du Goskomhydromét. de l'URSS en 1969-1870 par A.V. Chtcherbak, avec le concours de M.C. Déléour.

Les prévisions de l'apparition de glaces flottantes sur le fleuve avec une échéance de quelques jours, sont dressées d'après les relations empiriques ou par voie de calcul, en faisant appel à la prévision de la température de l'air.

Relation physico-statistique (empirique) pour la prévision à courte échéance de l'apparition des glaces

Essence de la méthode. Lors de l'établissement des prévisions à courte échéance de l'apparition des glaces on utilise largement les relations physico-statistiques ou empiriques des sommes de l'émission de chaleur (ou de ses caractéristiques relatives) nécessaires pour le

commencement des processus de formation des glaces à partir des facteurs déterminants. Dans ce contexte, on utilise surtout la relation exprimée par  $\sum \theta_- = f(\nu_0)$  ou  $\sum \theta_- = f(\nu_0, h)$  où  $\sum \theta_-$  - somme des températures d'air moyennes journalières négatives requises pour l'apparition des glaces;  $\nu_0$  et  $h$  - température de l'eau et profondeur du fleuve respectivement à la veille ou au jour où la température de l'air passe à des valeurs négatives. Souvent, au lieu de la valeur  $h$  on utilise comme caractéristique de l'influence de l'hydraulicité du fleuve sur le processus de la formation des glaces, la valeur du niveau  $H$  ou du débit  $Q$ .

Lors de l'établissement de la prévision à courte échéance de l'apparition des glaces, lesdites relations servent à l'établissement de la somme minima des températures d'air négatives ( $\sum \theta_-$ ) requise pour le commencement de la formation des glaces. La somme des températures d'air négatives, nécessaire pour l'apparition des glaces, est déterminée pour chaque cas concret en fonction de l'intensité de l'émission thermique et des réserves de chaleur dans le courant du fleuve.

La figure 1. montre la relation entre la somme minima de température d'air moyenne journalière négative  $(\sum \theta_-)_{\min}$  nécessaire pour l'apparition des glaces flottantes à Ismaïl, et la température de l'eau  $\nu_h$  et le débit d'eau au Cap Tchatal d'Ismaïl  $Q_h$  à la veille du jour où la température de l'air tombe, et passe à moins de  $0^\circ \text{C}$ . Pour sa construction ont été utilisées les données d'observations relevées en 1946-1967. De plus, ont été pris en considération tous les cas où, au cours de la saison automne-hiver, la température de l'air est tombée sous  $0^\circ \text{C}$ . Une telle approche exclut la nécessité de connaître

antérieurement si ledit dépassement de la température d'air de 0° C sera stable ou non.

L'expression analytique de la relation obtenue se présente comme suit:

$$\left(\sum \Theta_{-}\right)_{\min} = A \nu_{\#}^{1,29}$$

La valeur du paramètre A est définie en fonction des débits d'eau; quand  $Q_H > 4500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $A=10,5$ ; quand  $Q_H$  est de  $4500 - 3500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $A = 7,2$ ; quand  $Q_H < 3500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $A = 4,9$  (conformément aux courbes I - III sur la figure 1). Par l'introduction des débits d'eau on tient indirectement compte de la réserve thermique dans le cours d'eau; c'est-à-dire plus la valeur de l'hydraulicité du fleuve est grande, plus la somme de froid requise pour que la température de l'eau tombe à une valeur proche du 0° C est grande.

Le calcul des dates de l'apparition des glaces sur le Danube à Ismaïl en utilisant la relation obtenue donne des résultats satisfaisants: dans 92% des cas des prévisions de contrôle l'erreur ne dépasse pas la valeur admise qui est de 2 jours.

Schéma de l'établissement de la prévision. La prévision à courte échéance de l'apparition des glaces sur le Danube à Ismaïl est donnée pour le jour où la température d'air journalière moyenne dépasse 0° C selon la relation de la figure 1. Les données sur la température de l'eau  $\nu_{\#}$  sont reprises des données d'observation à Ismaïl, sur les débits  $Q_H$  d'après les données de Tchatal d'Ismaïl la veille du jour où la température de l'air a dépassé 0°C (d'après les données de la station météorologique

d'Ismaïl). La valeur  $Q_H$  est reprise de la courbe, en fonction de la valeur du niveau d'eau.

Selon les valeurs  $U_H$  et  $Q_H$  on reprend de la figure 1.  $(\sum \theta_-)_{\min}$  nécessaire pour l'apparition des glaces. La date d'apparition des glaces pronostiquée est le 2ème jour après que  $(\sum \theta_-)_{\min}$  est accumulée; cette valeur est établie d'après la prévision de la température de l'air. Dans le cas d'un refroidissement intense (température d'air moyenne journalière inférieure à  $-5^\circ\text{C}$ ) la date de l'apparition des glaces est établie en vertu de la date de l'accumulation  $(\sum \theta_-)_{\min}$ .

#### Calcul du temps de l'apparition des glaces selon la méthode de L.G. Choulakovski

Les relations empiriques utilisées dans la pratique de la publication des prévisions à courte échéance de l'apparition des glaces sont strictement locales. Pour leur construction on a besoin d'une longue période d'observation des phénomènes de glaces. Tenant compte de cette circonstance, L.G. Choulakovski (Hydrométcentre URSS) a élaboré une méthode qui permet de calculer l'apparition des glaces aux fins de la prévision à courte échéance, quand les données d'observation des phénomènes de glaces sont insuffisantes ou absentes.

L'utilisation de ladite méthode pour le calcul de la date de l'apparition des glaces sur le secteur soviétique du Danube, a été réalisée en tenant compte des conditions spécifiques de la région considérée.

La méthode de calcul est basée sur la résolution de l'équation du bilan thermique de la surface d'eau qui peut s'exprimer comme suit:

$$A + B = 0 \quad (1)$$

où A - courant thermique entre la masse d'eau et la surface de partage eau-air; B - la résultante (sur la surface d'eau) de l'affluence thermique émanant de l'échange de rayonnement thermique R, de l'évaporation et de la condensation LE, ainsi que de l'échange thermique turbulent entre la surface d'eau et l'air P.

La valeur A peut s'exprimer comme suit

$$A = \mathcal{L} (\nu - \nu_{\pi\theta}), \quad (2)$$

où  $\mathcal{L}$  - coefficient de l'émission thermique (coefficient de l'émission thermique de la masse d'eau vers la surface de partage eau-air);  $\nu$  - température d'eau moyenne dans le profil ou selon la profondeur;  $\nu_{\pi\theta}$  - température de la surface d'eau.

Dans ce cas-là l'équation du bilan thermique (1) peut s'exprimer comme suit:

$$\mathcal{L} (\nu - \nu_{\pi\theta}) + B = 0 \quad (3)$$

La formation des glaces à la surface du fleuve commence quand la température de la surface d'eau baisse jusqu'à la température du gel et l'émission thermique de la surface d'eau est supérieure à l'affluence thermique émanant de la masse d'eau. Partant de ce fait, Choulavski a obtenu l'expression suivante pour les conditions du commencement de la formation des glaces

$$\nu_n \leq - \frac{B_n}{\mathcal{L}_n} \quad (4)$$

L'inégalité (4) indique qu'au moment  $n$ , quand  $\mathcal{U}_{n0} = 0$ , la formation des glaces sur la surface d'eau devient possible quand la température d'eau moyenne dans le courant ou selon la profondeur  $\mathcal{U}_n$  est inférieure (ou égale) à la valeur  $-\frac{B_n}{\alpha_n}$

De cette façon le calcul du moment de l'apparition des glaces selon la méthode de Choulavski, se résume à définir pour un moment donné  $n$  les valeurs suivantes:

- a) température d'eau moyenne dans la coupe ou en profondeur  $\mathcal{U}_i$ ,
- b) émission thermique de la surface d'eau  $B_n$ ,
- c) coefficient de l'émission thermique  $\alpha_n$ .

En résultat de la résolution de l'équation différentielle du changement de la température dans le courant du fleuve, L.G. Choulavski a obtenu une série d'expressions approximatives permettant de calculer la température de l'eau à un moment donné.

Le secteur du Danube traité dans cet ouvrage est situé à l'extrémité sud-ouest de STU où dans la période automne-hiver le régime de la température se distingue par une grande instabilité, avec des changements brusques de la température de l'air dans la période du refroidissement de l'eau. Sur une majeure partie de sa longueur le secteur traité se distingue par une alimentation modérée en eaux souterraines. Dans de telles conditions on peut utiliser l'expression suivante pour le calcul de la température de l'eau

$$\begin{aligned}
 \nu_n = \nu_0 e^{-n a_0} + \sum_{i=1}^n \left[ \theta_i (e^{-(n-i) a_0} - e^{-(n-i+1) a_0}) + \right. \\
 \left. + \left[ \frac{d}{k} + \frac{\alpha + k}{\alpha k} (q_n + q_r + q_3) \right] (1 - e^{-n a_0}) \right]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$\text{où } a_0 = \frac{t \alpha k}{(\alpha + k) \cdot h \cdot c \cdot \rho}$$

Ici  $\nu_n$  - température d'eau moyenne dans le profil ou en profondeur, dans le profil de calcul au moment donné;  $\nu_0$  - température de la tranche d'eau supérieure dans le profil initial, prise en tenant compte du temps d'écoulement entre le profil initial et le profil de calcul;  $n$  - nombre de jours à partir du commencement du calcul (durée de la période de calcul);  $i$  - numéro d'ordre des jours à partir du commencement du calcul;  $\theta_i$  - température d'air moyenne au cours des jours  $i$ ;  $\alpha$  - coefficient de l'émission thermique;  $k$  - coefficient de l'échange thermique,  $d$  - échange thermique spécifique quand la température d'air est égale à la température de l'eau de surface;  $t$  - unité de temps (jours),  $h$  - profondeur moyenne dans le secteur,  $c$  - capacité spécifique de stockage thermique de l'eau;  $\rho$  - densité de l'eau;  $q_n$ ,  $q_r$  et  $q_3$  - apport thermique spécifique selon le lit du fleuve, avec eaux souterraines, et sous l'influence de la dissipation de l'énergie.

Dans ce cas, les conditions du commencement de la formation des glaces peuvent s'exprimer comme suit:

$$\begin{aligned}
 & \nu_0 e^{-na_0} + \sum_{i=1}^n \left[ \Theta_i (e^{-(n-i)a_0} - e^{-(n-i+1)a_0}) \right] + \\
 & + \left[ \frac{d}{k} + \frac{\lambda+k}{\lambda k} (q_n + q_r + q_s) \right] (1 - e^{-na_0}) \leq - \frac{B_n}{\lambda n}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Le calcul du moment de l'apparition des glaces sur le Danube à Ismaïl se résume en la résolution de l'inéquation ci-dessus (6). Dans ce cas-là on utilise la documentation portant sur les observations des phénomènes de glaces, les caractéristiques hydrométriques (niveaux et débits d'eau, vitesse du courant), la température de l'eau et de l'air, la force du vent, la nébulosité pendant la période 1953-1966. Ces données sont reprises des matériaux d'observation de l'Observatoire hydrométéorologique du Danube, des annuaires météorologiques de "CPP" et des annuaires hydrologiques du Danube publiés par la Commission du Danube.

Comme profil initial on a choisi Calafat. La longueur du fleuve de Calafat à Ismaïl est de 742 km. Le choix de ce secteur pour le calcul est fondé sur la disponibilité des données de base et sur la nécessité de mettre en concordance l'échéance de la prévision de la date de l'apparition des glaces avec l'échéance de la prévision des éléments météorologiques. Cette dernière, comme on le sait, est d'en moyenne 3-5 jours. Le coefficient de l'émission thermique est calculé selon la formule suivante:

$$\lambda = (1660 u + 170 w) C \text{ jour, degré} \tag{7}$$

où  $u$  - vitesse moyenne du courant en m/s;  $w$  - vitesse du vent en m/s.

Le calcul de la valeur  $B_n$  est exécuté selon les formules connues, utilisées pour le calcul de la radiation effective, de l'évaporation et de l'échange turbulent de la chaleur.

La valeur du coefficient  $k$  est définie en fonction de la vitesse du vent, de la température de l'eau et de l'air, tandis que le paramètre  $d$  selon la latitude, la date et la vitesse du vent. La valeur de l'échange de la chaleur spécifique  $d$ ) est défini d'après les données d'observation de la station météorologique d'Ismaïl, selon l'équation

$$d = Q + J_3' + LE' \quad \text{cal/cm}^2 \quad \text{jour} \quad (8)$$

où  $Q$  - apport de chaleur résultant de la radiation solaire;  $J_3'$  et  $LE'$  respectivement, radiation effective et échange thermique liée à l'évaporation quand la température de l'air est égale à la température de l'eau de surface. La valeur de l'humidité de l'air ( $e_{200}$ ) nécessaire pour le calcul de  $LE'$  est établie d'après la relation ( $e_{200}$ ) auprès d'une température d'air  $\theta_{200}$ . Pour cette région, a été obtenue une relation suffisamment étroite entre  $e_{200}$  et  $\theta_{200}$ , qui peut s'exprimer comme suit:  $e_{200} = e^{0,008\theta_{200} + 1,6}$ .

L'ordre du calcul des valeurs  $\alpha_n$ ,  $\alpha_n$  et  $B_n$  est exposé en détail dans le guide des prévisions hydrologiques, fascicule 4, Hydrométéoizdat, L, 1963, et dans les Oeuvres de UKRNIGMI 1971, fascicule 104, pages 57-68.

Les résultats du calcul de la température de l'eau et de la date de l'apparition des glaces sur le Danube à Ismaïl selon la méthode exposée ont montré que dans 83% des calculs l'erreur est 0, et dans un seul cas (sur 23) l'erreur était de 3 jours. La fréquence de l'erreur de plus de 1 jour est de 87%, et celle de 2 jours au maximum 97%.

L'utilisation de la méthode donnée pour la prévision des dates de l'apparition des glaces suppose l'utilisation de la prévision des principaux éléments météorologiques avec une échéance de 3-5 jours.

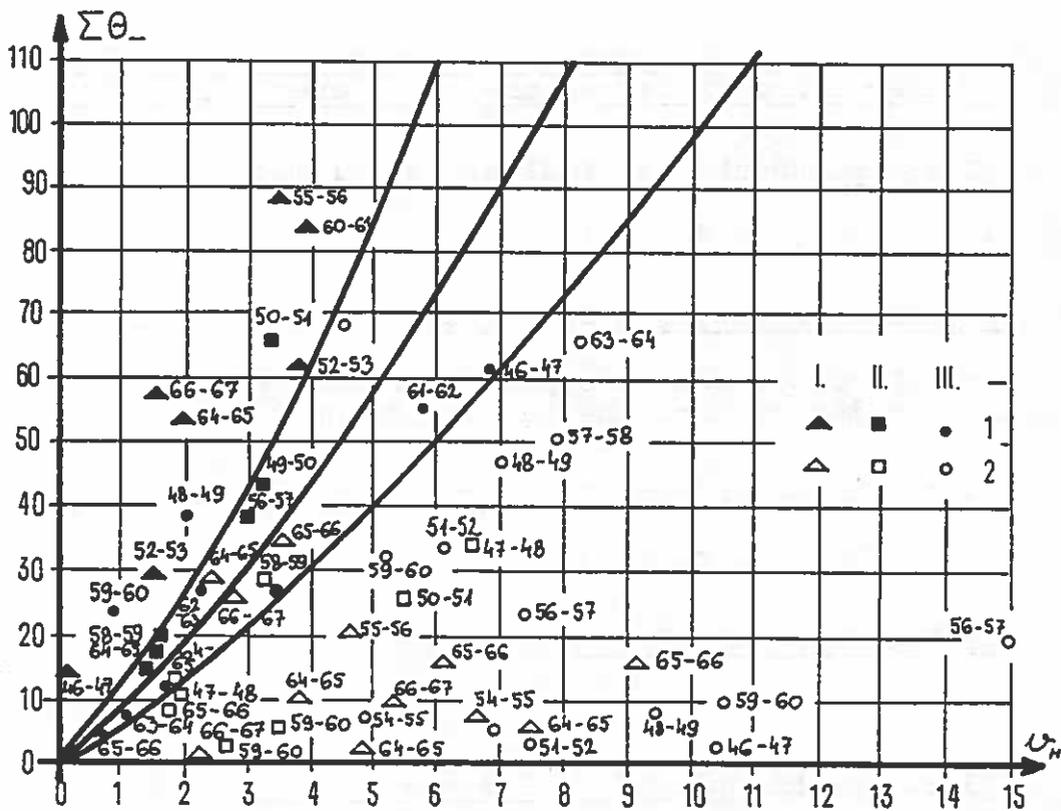


Fig. 1 - Relation entre la somme minima des températures d'air moyennes journalières négatives  $(\Sigma\theta_{-})_{\min}$  nécessaire pour l'apparition de glaces flottantes sur le Danube à Ismaïl et la température d'eau  $U_{\text{H}}$  et le débit d'eau  $\theta_{\text{H}}$  au Cap Tchatal d'Ismaïl, à la veille de la date où la température d'air dépasse  $0^{\circ}\text{C}$ .

1 - la glace apparaît; 2 - il n'y a pas de glaces; aux points - années

I. -  $Q_{\text{H}} > 4500 \text{ m}^3/\text{s}$  , II. -  $Q_{\text{H}} = 4500 - 3500 \text{ m}^3/\text{s}$

III. -  $Q_{\text{H}} < 3500 \text{ m}^3/\text{s}$

4.3.3 Méthodes de formulation des prévisions à longue échéance de la rupture des glaces sur le Danube

4.3.3.1 En République Fédérale d'Allemagne

Voir 4.1.2.1

4.3.3.2 En République d'Autriche

Là également, des prévisions ne sont pas établies en Autriche sur ces phénomènes.

4.3.3.3 En République Fédérative Tchèque et Slovaque

Voir 4.1.1.3

4.3.3.4 En République de Hongrie

Voir 4.3.1.4

4.3.3.5 En République Socialiste Fédérative de Yougoslavie

Voir 4.1.2.5

4.3.3.6 En République de Bulgarie

Le Secrétariat n'a pas reçu de matériaux.

4.3.3.7 En Roumanie

Sur la durée de la prise du fleuve sur le Danube  
(Dr. Pompiliu Mita, Gabriel Andreescu, Institut de Météorologie et Hydrologie, Bucarest, Roumanie)

Il est connu que pour des raisons justifiées de protection, on n'effectue pas de mesurages concernant l'épaisseur de la glace sur le Danube comme pour les cours d'eau intérieurs.

C'est justement pourquoi dans l'analyse de la durée de la prise du fleuve on a tenu compte des études précédemment effectuées sur la durée de la prise des rivières dans les cas des cours d'eau intérieurs:

a) les études portant sur la dépendance entre l'épaisseur de la glace ( $H_g$ ) et la somme des températures négatives de l'air ( $\sum t_{\text{air}}^-$ )

$$H_g = A \left( \sum t_{\text{air}}^- \right)^n$$

où:  $A$  - coefficient de proportionnalité

$n$  - coefficient qui prend des valeurs proches de 0,5

b) les études portant sur la relation entre le nombre des jours de la période du débâcle (couvrant un intervalle qui commence avec l'enregistrement de l'épaisseur maximum de la prise du fleuve jusqu'à sa disparition), l'épaisseur maximum et la température moyenne journalière de l'air pendant l'intervalle considéré.

A partir des relations établies antérieurement, on est arrivé à une formule pour le calcul de la durée totale de la prise du fleuve sur le Danube

$$N = \alpha \sqrt{\sum t^-} + \beta$$

où:  $\alpha$  = coefficient de proportionnalité

$\beta$  = terme qui exprime l'apport d'autres facteurs

Un autre facteur mis en évidence dans l'analyse de la durée de la prise du fleuve est la pression exercée sur la prise du fleuve par les débits croissants.

Dans le cas des sections à grandes dimensions tel que celles du Danube inférieur, on peut considérer que la pression varie proportionnellement avec l'accroissement "C" (m<sup>3</sup>/s/jour) du débit d'eau; de cette façon, cela engendrera la réduction du nombre des jours N, conformément à une relation de la forme:

$$N = \alpha \sqrt{\sum t^-} - \gamma C \pm \omega$$

où  $\pm \omega$  représente un terme résiduel.

On a établi les relations  $N=f(\sum t^-, C)$  pour les stations hydrologiques Tulcea et Giurgiu à l'aide d'une corrélation bidimensionnelle binaire entre les valeurs  $N, \sum t^-$  et  $(-C)$ .

Le plan de regression de la valeur N sur les variables  $\sum t^-$  et  $(-C)$  est donné par l'expression:

$$N - \bar{N} = b_1 (\sum t^- - \overline{\sum t^-}) + b_2 (C - \bar{C})$$

où  $N, \sum t^-, \bar{C}$  - représentent les moyennes des séries  $N, \sum t^-, C$ ;  $b_1$  et  $b_2$  sont déterminés par des coefficients de corrélation et des déviations standard des 3 séries des valeurs.

Les équations suivantes ont été obtenues:

$N = 4,7 \cdot \sqrt{\sum t^-} - 0,6C + 14,3$  - pour la station hydrométrique Tulcea, avec un coefficient de corrélation général  $R = 0,918$  et

$N = 3,72 \cdot \sqrt{\sum t^-} - 0,024C - 5,4$  - pour la station hydrométrique Giurgiu, avec un coefficient de corrélation général  $R = 0,975$ .

Les relations graphiques représentées sur la Figure 1 montrent que la durée maximum possible de la prise du fleuve peut être d'environ 95-100 jours à la station hydrométrique Tulcea et d'environ 75-80 jours à la station hydrométrique Giurgiu, ce qui concorde avec les valeurs maxima enregistrées pendant l'intervalle d'observation (81 jours à Tulcea et 69 jours à Giurgiu).

En même temps, il faut souligner le fait que dans le cas de longues durées de la prise du fleuve pendant quelques hivers, la relation de prognose n'est plus sûre, suite à la précision de la prognose météorologique moins exacte dans le cas des durées extrêmement longues de temps.

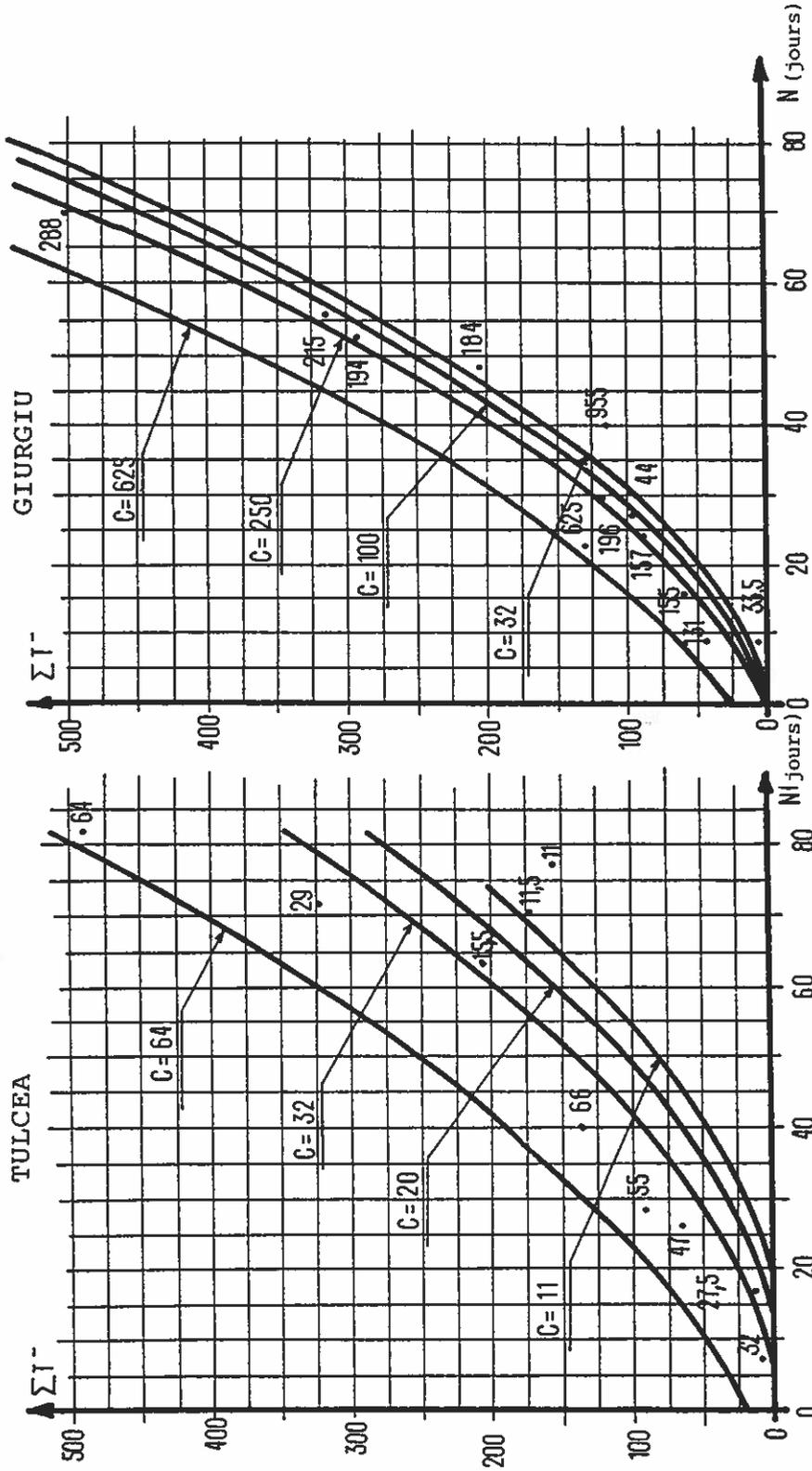


Fig. 1 - Relation  $N=f(t^-,C)$  pour les stations hydrométriques Tulcea et Giurgiu

## Bibliographie

1. C. Diaconu - Possibilités de prévision des niveaux dans les conditions d'existence de la prise du fleuve sur le Danube.  
La IIIème Conférence internationale portant sur les prévisions hydrologiques des pays danubiens. Bucarest, 1965.
2. D. Dumitrescu - La prévision à longue échéance portant sur l'apparition de la prise du fleuve et du débâcle sur le Danube.  
La VIIème Conférence portant sur les prévisions hydrologiques des pays danubiens Regensburg, 1975 (konferenzbericht Koblenz, 1977).
3. P. Mita - Possibilités de prévision de l'apparition et de l'évolution de la prise du fleuve sur le Danube inférieur  
La Vème Conférence portant sur les prévisions hydrologiques des pays danubiens. Belgrad, 1969 (Zbornik dokladov, Belgrad, 1970).
4. P. Mita - Méthode de prévision de l'apparition de la prise du fleuve influencé par la température de l'air et le débit d'eau.  
La VIIème Conférence portant sur les prévisions hydrologiques des pays danubiens.  
Regensburg, 1975 (Konferenzbericht Koblenz 1977).

5. P. Mita  
G. Andreescu - On ice bridge phenomenon occurrence on the Danube  
XIII Conference of the Danube countries on hydrological forecasts. Belgrad, 1986
6. M. Podani - Les glaçons sur le Danube durant l'intervalle janvier-mars 1985. Genèse, effets, mesures et conclusions. Hidrotechnica, vol.30, nr.7, 1985, Bucuresti.

#### 4.3.3.8 En Union des Républiques Socialistes Soviétiques

##### Méthodes de formulation des prévisions à courte et à longue échéance de la rupture des glaces sur le secteur soviétique du Danube

(A.V. Chtcherbak, L.N. Chmataliouk (URSS))

Les méthodes de formulation des prévisions à courte et à longue échéance de la rupture des glaces sur le secteur soviétique du Danube, exposées ci-après, ont été élaborées en 1976 à l'Institut de recherches scientifiques régional d'Ukraine du Comité National hydrométéorologique de l'URSS, sous la conduite de A.V. Chtcherbak; les recherches sur les conditions météorologiques de la rupture des glaces ont été exécutées par L.N. Chmataliouk.

Méthode de formulation des prévisions à courte échéance de la rupture des glaces

Essence de la méthode. Les méthodes existantes de formulation des prévisions à courte échéance de la rupture de la couche de glace sur les

fleuves sont fondées sur le calcul de l'afflux de la chaleur sur la couche de glace au moyen de l'introduction, dans le calcul, des caractéristiques de la température de l'air ou au moyen du calcul de l'échange de chaleur d'après les données météorologiques.

Les matériaux des observations pluriannuelles de l'épaisseur de la couche de glace et des dates de sa rupture sur le secteur soviétique du Danube montrent qu'ici la rupture se produit le plus souvent sous l'influence du facteur thermique et qu'en général elle n'est pas liée à la hausse considérable du niveau d'eau. Par suite de l'instabilité du régime de température pendant la période hivernale dans la région examinée, l'épaisseur moyenne de la couche de glace sur le Danube en aval de Réni et dans le bras de Kilia du delta est en général de 15-25 cm jusqu'au moment de la hausse de la température au printemps.

Partant de ce qui précède, on a essayé d'élaborer la méthode de formulation des prévisions à courte échéance des dates de la rupture des glaces sur le secteur soviétique du Danube en se fondant sur le calcul de l'afflux de chaleur sur la couche de glace et en introduisant dans le calcul les caractéristiques de la température de l'air.

Ayant en vue les variations insignifiantes qui, au cours de diverses années de la période examinée (1946-1975), se présentent dans la somme des températures d'air moyennes journalières positives ( $\sum \Theta_+$ ) requise pour la rupture, et dans la période de son accumulation, le point de départ pour l'élaboration de la méthode a été la supposition qu'il peut exister une certaine limite  $\sum \Theta_+$  dont la période d'accumulation est

en relation avec la période d'accumulation nécessaire pour la rupture  $\sum\Theta_+$ .

Après avoir analysé l'évolution de la température d'air dans la période du dégel ainsi que dans la période où la température dépasse définitivement  $0^\circ\text{C}$ , il a été établi qu'une telle limite  $\sum\Theta_+$  pouvait être fixée à  $12^\circ\text{C}$ . La Figure 1 présente la relation entre les dates de la rupture de la couche de glace enregistrées aux alignements de Réni, Ismaïl, Kilia et Vilkovo et la date de l'accumulation  $\sum\Theta_+ = 12^\circ\text{C}$ . En tant que troisième variable, qui caractérise indirectement l'épaisseur de la couche de glace, on a pris en compte la somme des températures moyennes journalières négatives de l'air  $\sum\Theta_-$  comptée à partir de la date de la prise du fleuve jusqu'à la date où la température de l'air dépasse définitivement  $0^\circ\text{C}$ , et atteint une valeur positive.

L'évaluation des relations obtenues au moyen de la formulation des prévisions de contrôle démontré une fiabilité satisfaisante. Des 21 prévisions de contrôle 3 prévisions seulement ne se sont pas justifiées pour les stations Réni, Ismaïl et Kilia et 4 pour la station Vilkovo. Sans tenir compte des cas de cassage artificiel de la couche de glace qui eut lieu en 1963 et 1969, la fréquence de la fiabilité des prévisions, avec l'erreur admise, est de 91-96%. L'échéance des prévisions pour les stations indiquées est d'en moyenne 2 jours quand  $\sum\Theta_- < 100^\circ\text{C}$ , 4-5 jours quand  $\sum\Theta_-$  est entre 100 et  $300^\circ\text{C}$ , et 10-14 jours quand  $\sum\Theta_- > 300^\circ\text{C}$ .

Schéma de formulation des prévisions à courte échéance. Pour le secteur soviétique du Danube les prévisions à courte échéance de la rupture des glaces formulées à l'aide des relations pré-

sentées dans la fig. 1, se font le jour où la somme des températures d'air positives accumulées est égale à 12°C, et en fonction de la somme des températures d'air négatives accumulées jusqu'au moment où la température dépasse 0°C, en comptant à partir de la date de la prise du fleuve au profil donné.

Les informations sur la température de l'air sont reprises des données d'observation de la station météorologique d'Ismaïl. Si l'on utilise les données sur la température de l'air puisées dans la prévision du temps, l'échéance des prévisions peut être augmentée de 2-3 jours.

Méthode de formulation des prévisions à longue échéance de la rupture de la couche de glace

Essence de la méthode. Comme il a déjà été noté, les dates de la rupture de la couche de glace sur le secteur soviétique du Danube sont déterminées en premier lieu par l'intensité de la hausse de température. Dans ce contexte, les recherches sur les conditions de la circulation synoptique ont une très grande importance pour l'estimation du caractère probable de l'évolution du processus de destruction de la couche de glace dans la prochaine saison hiver-printemps.

La transformation des processus atmosphériques d'une saison à l'autre se manifeste dans le changement de l'afflux thermique dans la troposphère. Les conditions d'un réchauffement plus intense ou d'un réchauffement moins intense d'une saison par rapport à l'autre peuvent être évaluées à l'aide des cartes de topographie relative TR<sup>500</sup><sub>1000</sub>. B.M. Ginsburg (Centre hydrométéorologique de l'URSS) a établi qu'au cours de la période froide de l'année (de novembre à

mars) on observe un gradient horizontal constant  $H_{1000}^{500}$  dirigé du sud-ouest vers les régions méridionales et centrales du STU. L'accroissement de ce gradient depuis la saison précédente jusqu'à la saison actuelle conduira à une augmentation de la chaleur dans la saison suivante, tandis que la diminution du gradient conduira à un réchauffement moindre. Cette thèse a servi de base pour l'élaboration de la méthode de formulation des prévisions à longue échéance de la rupture de la couche de glace sur le Bas-Danube.

Pour déterminer les caractéristiques du réchauffement, deux périodes ont été choisies: du 1<sup>er</sup> au 31 janvier (première moitié de l'hiver) et du 1<sup>er</sup> au 28 février (deuxième moitié de l'hiver).

La caractéristique sommaire du réchauffement pendant ces périodes a été déterminée de la manière suivante: on a choisi les jours où la température moyenne journalière de l'air (d'après les données de la station météorologique d'Ismail) a augmenté par rapport à la valeur observée la veille et a été supérieure à  $-5^{\circ}\text{C}$ , c'est-à-dire pour chacun des jours des périodes ci-haut mentionnées on a compté le dépassement de la température moyenne journalière de l'air de  $-5^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta\theta = \theta + 5$ ).

$\sum \Delta\theta$  Pour la période donnée est ainsi adoptée comme caractéristique de la somme du réchauffement. La différence  $\delta \sum \Delta\theta = \sum_{28/1} \Delta\theta - \sum_{27/1} \Delta\theta$  caractérise le changement de l'intensité du réchauffement à partir de la première moitié de l'hiver jusqu'à la deuxième moitié.

Il est possible d'obtenir en temps utile une évaluation de l'intensité du réchauffement dans la période de la rupture de la couche de glace à venir sur la base du changement de l'afflux

d'air chaud dans la troposphère entre la saison précédente et la saison en cours, qui est fonction du changement du gradient de géopotential relatif.

Le poids du changement dudit gradient est caractérisé par la variabilité des valeurs moyennes des écarts par rapport à la norme du géopotential relatif à deux groupes de points situés dans la direction du courant dominant. Le choix de ces deux régions est fait de manière que le secteur du fleuve traité se situe à la frontière entre la région occidentale (par rapport au secteur du fleuve donné) et la région orientale. Les valeurs dans les régions choisies ont été calculées depuis la période précédant l'hiver jusqu'à la première moitié de l'hiver, soit dans notre cas

$$\delta_{\text{grad}} \Delta H = \Gamma_{\frac{x_{n+1}}{2}} - \Gamma_{x_1}$$

La valeur du réchauffement prévu pour la deuxième moitié de l'hiver a été déterminée selon la relation  $\delta \Sigma \Delta \theta = f \left( \frac{\delta_{\text{grad}} \Delta H}{\Delta \theta} \right)$  (fig. 2), où  $\Delta \theta$  = anomalie de la température moyenne journalière en janvier dans la région traitée. La valeur est calculée d'après les données de 12 stations météorologiques se trouvant au sud-ouest du STU.

L'évaluation de cette fonction a montré que la relation  $\overline{\delta/\theta} = 0,66$ . Dans le cas d'un choix limité des informations de base (11 cas) la relation donnée peut être considérée satisfaisante.

La valeur  $\delta \Sigma \Delta \theta'$  établie selon la relation donnée représente, avec la somme du réchauffement effectif en janvier  $\sum_{j=1}^{m'} \Delta \theta$  la caractéristique sommaire du réchauffement  $\Sigma \Delta \theta'$  qui conditionne, sur le secteur du fleuve traité,

les dates de la rupture de la couche de glace. Par l'introduction de  $\sum_{1/1}^{31/1} \Delta \theta$  on peut tenir compte de l'influence qu'exercent sur l'état de la couche de glace (épaisseur, résistance) les périodes de réchauffement relatif survenant en janvier.

La relation entre les dates moyennes de la rupture de la couche de glace sur le secteur soviétique du Danube (en cas d'écart de la norme) et la valeur  $\sum \Delta \theta' = \sum_{1/1}^{31/1} \Delta \theta + \delta \sum \Delta \theta'$  est présentée dans la fig. 2. En tant que troisième variable, qui caractérise indirectement l'épaisseur de la glace, on a adopté la somme des températures d'air négatives pour la période du 16 décembre jusqu'au 31 janvier ( $\sum_{1/1}^{31/1} \theta_-$ ).

Ladite relation est caractérisée par  $\overline{\delta/\delta'} = 0,42$ , ce qui permet d'en recommander l'utilisation pour la formulation des prévisions des dates de la rupture de la couche de glace sur le Danube inférieur. La fréquence de la fiabilité des prévisions, avec l'erreur admise, est de 91%. Si la prévision est publiée le 1<sup>er</sup> février, l'échéance moyenne est de 20 jours et varie entre 8 jours, en cas de rupture très précoce, et 56 jours en cas de rupture très tardive.

Schéma de formulation des prévisions à longue échéance de la rupture de la couche de glace. La prévision est formulée le 1<sup>er</sup> février, dans l'ordre suivant:

1. Sur la base des données de la température d'air moyenne journalière d'après la station météorologique d'Ismaïl on calcule la somme du réchauffement en janvier  $\sum_{1/1}^{31/1} \Delta \theta$  pour les jours où la température était en hausse et a dépassé  $-5^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta \theta = \theta + 5$ ), ainsi que la somme des températures d'air moyennes journalières négatives

pour la période du 16 décembre au 31 janvier  
 $\left( \sum_{1/i}^{31/i} \Theta_- \right)$ .

2. Sur la base des données du Centre hydrométéorologique de l'URSS concernant la valeur de l'écart de la norme du géopotential relatif  $H_{1000}^{500}$  on calcule les valeurs suivantes:

a) la valeur moyenne  $\Delta H_{1000}^{500}$  aux points de repère de chacune des régions choisies, et le changement de cette valeur d'une région à l'autre en novembre, décembre et janvier;  $(\delta_{grad} \Delta H)$ ,

b) le changement du gradient  $\Delta H_{1000}^{500}$  depuis la période précédant l'hiver jusqu'à la première moitié de l'hiver.

3. D'après les données des stations météorologiques Ivano-Frankovsk, Tchernovtsi, Hmelnit-ski, Vinnitsa, Moghilev-Podolski, Uman, Lioubachovka, Serbka, Kichiniev, Odessa, Herson et Ismaïl, on détermine l'anomalie de la température moyenne mensuelle de l'air  $(\Delta \Theta_1)$  en janvier.

4. Partant de la valeur de la relation  $\frac{\delta_{grad} \Delta H}{\Delta \Theta_1}$  on détermine la valeur du changement du réchauffement depuis la première moitié jusqu'à la deuxième moitié de la saison synoptique hivernale  $(\delta \Sigma \Delta \Theta)$ .

5. Sur la base des valeurs  $\sum_{1/i}^{31/i} \Delta \Theta + \delta \Sigma \Delta \Theta'$  et  $\sum_{1/i}^{31/i} \Theta_-$  et à l'aide de la relation présentée sur la fig. 2. on peut établir la date prévue de la rupture de la couche de glace s'écartant de la norme.

La date de la rupture  $\Pi_B = \bar{\Pi}_B + \Delta T$ , où  $\bar{\Pi}_B = 21$  février.

L'erreur de prévision admise  $\delta_{\text{дон}}$  = 8 jours.

Les résultats des recherches portant sur l'élaboration des méthodes de formulation des prévisions à courte et à longue échéance de la rupture de la couche de glace sur le secteur soviétique du Danube sont exposés dans les oeuvres de l'Institut de recherches scientifiques régional d'Ukraine du Comité national hydrométéorologique de l'URSS 1978, fasc. 166, pages 116-124.

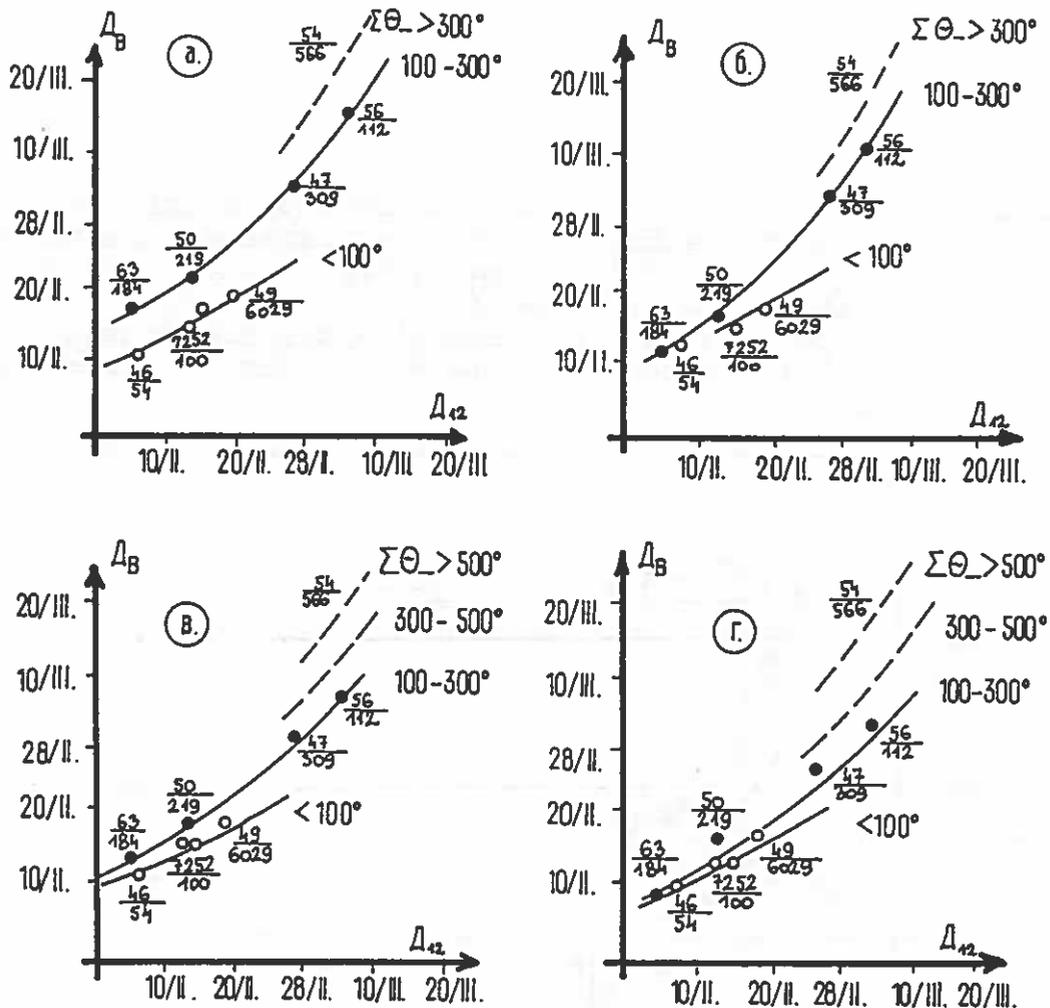
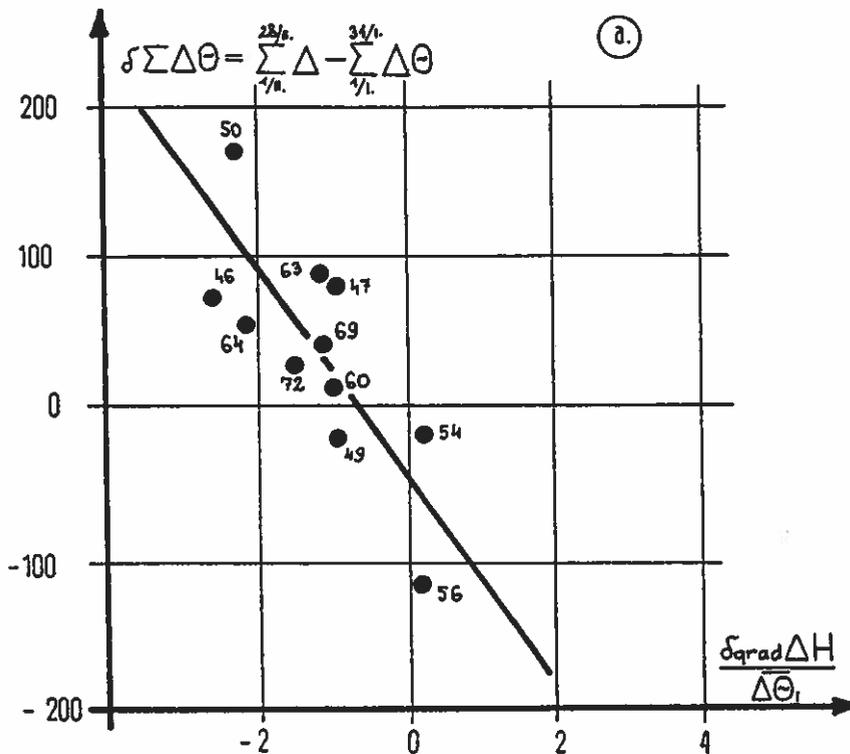


Fig. 1 - Relation entre les dates de la rupture de la couche de glace sur le Danube ( $\Delta_B$ ) à Réni (a), Ismaïl (b), Kilia (c) et Vilково (d) et la date de l'accumulation à 12°C ( $\Delta_{12}$ ) de la somme des températures d'air moyennes journalières positives et la somme des températures d'air moyennes journalières négatives pendant la période de prise du fleuve ( $\Sigma\Theta_-$ ).  
 Aux points: au numérateur - années  
 au dénominateur -  $\Sigma\Theta_-$

Fig. 2 a) Changements de la somme du réchauffement dans la période entre la première moitié de l'hiver ( $\delta \sum \Delta \theta$ ) en fonction du gradient du géopotential relatif ( $\delta_{grad} \Delta H$ ) précédant les changements, et de l'anomalie des températures de l'air en janvier ( $\Delta \theta$ ); aux points - années.



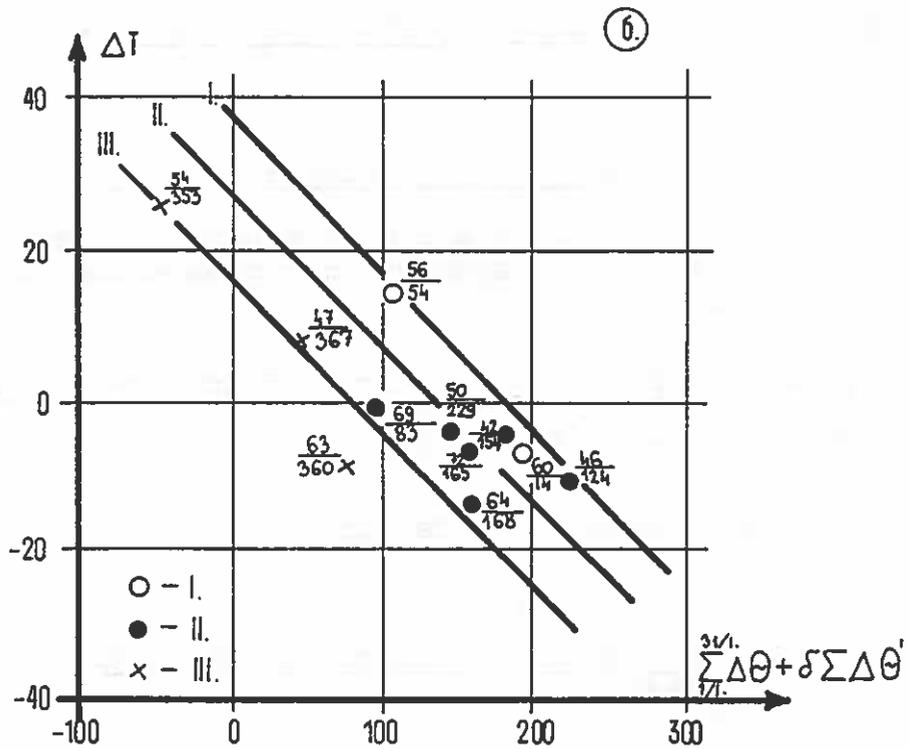


Fig. 2 b) Relation des écarts entre la norme des dates de la rupture de la couche de glace sur le secteur soviétique du Danube ( $\Delta T$ ) par rapport à la caractéristique sommaire du réchauffement ( $\frac{\sum_{16/XI}^{31/I} \Delta \theta + \delta \sum_{16/XI}^{31/I} \Delta \theta'}{\sum_{16/XI}^{31/I} \theta_-}$ ) et la somme des températures d'air négatives  $\sum_{16/XI}^{31/I} \theta_-$  au cours de la période du 16.XII au 31.I. Aux points - au numérateur: années, au dénominateur  $\sum_{16/XI}^{31/I} \theta_-$ : moins de 150° (I), 150-250° (II), plus de 250° (III).

4.3.4 Méthodes de formulation des prévisions à courte échéance de la prise du fleuve (Danube)

4.3.4.1 En République Fédérale d'Allemagne

Voir 4.1.2.1

4.3.4.2 En République d'Autriche

Des prévisions à courte échéance de la prise du fleuve ne sont pas non plus établies en Autriche.

4.3.4.3 En République Fédérative Tchèque et Slovaque

Voir 4.1.1.3

4.3.4.4 En République de Hongrie

Voir 4.3.1.4

4.3.4.5 En République Socialiste Fédérative de Yougoslavie

Voir 4.1.2.5

4.3.4.6 En République de Bulgarie

Le Secrétariat n'a pas reçu de matériaux.

4.3.4.7 En Roumanie

L'analyse de l'apparition de la prise du fleuve sur le cours inférieur du Danube  
(Dr. Pompiliu Mița, Gabriel Andreescu, Institut de Météorologie et Hydrologie, Bucarest, Roumanie)

Les préoccupations concernant l'élaboration de la prévision portant sur l'évolution de la glace s'encadrent dans le cycle de mesures entreprises afin de prévenir et de combattre les effets nuisibles de la glace.

L'hiver 1984-1985 a démontré pleinement ce que signifient ces effets, qui ont provoqué à l'économie nationale des dommages importants, causés par l'épuisement considérable des débits d'eau suite aux stoks d'eau dans les couches de glace, et aussi aux inondations provoquées par les embâcles d'automne étendus sur de grands secteurs des cours d'eau.

Pour le Danube, à ces effets nuisibles s'ajoute aussi l'immobilisation de nombreux navires roumains ou étrangers entre les glaces.

Ainsi on justifie les préoccupations concernant la connaissance de l'évolution de la glace et des facteurs qui la déterminent sur les cours d'eau intérieurs, et, particulièrement sur le Danube, en concordance avec l'importance des effets produits par les phénomènes de glace.

On mentionne, dans le cas des cours d'eau intérieurs, les relations de prévision de la glace et de la débâcle élaborées par V. Dumitrescu et M. Stan (2). La connaissance de l'évolution de la glace sur le Danube a été approfondie par beaucoup d'autres spécialistes; C. Diaconu (1), V. Dumitrescu (2), (3), M. Stan (2), M. Podani (6), etc.

L'analyse des données portant sur l'évolution des phénomènes de glace sur le Danube inférieur, couvrant une période de 50 ans, relève que la prise du fleuve se produit à une fréquence qui varie sur ce secteur de 44% à 56% (44,1% à Calarasi, 56,0% à Cernavoda, 50,0% à Tulcea).

Une fréquence et une intensité plus grandes des phénomènes de glace sur le Danube en aval de Giurgiu et surtout en aval de Calarasi, sont tout d'abord le résultat de la circulation atmosphérique d'origine polaire, plus fréquente pendant l'hiver dans ce secteur du fleuve, mais aussi le résultat des débits et des vitesses plus réduits sur les bras du Danube.

Cette situation démontre l'importance tout à fait particulière de l'élaboration de certains modèles de prévision de la glace, spécialement pour le secteur inférieur du Danube.

On présente ci-dessous une méthode qui repose sur les données fournies par les stations hydrométriques Cernavoda et Tulcea, prenant en considération le principal facteur génétique - la température de l'air, et le plus important facteur conditionnel - le débit d'eau.

Les dates auxquelles on a enregistré certaines températures de l'eau (3°C; 2,5°C; 2°C; 1,5°C; 1°C) ont été considérées comme moments de référence pour l'élaboration de la prévision, les intervalles prognosés se déroulant entre la date de l'enregistrement de ces températures et la date de formation de la prise du fleuve (environ 0°C).

En égard du fait que la diminution de la température de l'eau se produit lentement par suite d'un grand volume d'eau soumis à l'échange thermique, le choix de ces températures comme moments de référence pour l'élaboration de la formation de la prise du fleuve, est considéré correct du point de vue du temps optimum de prévision. Pour diminuer la température de l'eau dans la section Tulcea d'un seul degré par exemple, il est nécessaire, au moins, d'une période de 4-5 jours à températures moyennes journalières de l'air de -9°C, -10°C.

On peut considérer que la date de l'enregistrement de la température de l'eau de 1°C constitue le moment de l'élaboration d'une prévision à courte échéance de la prise du fleuve, ainsi que les dates de l'enregistrement de certaines valeurs de l'eau de 2°C ou 3°C peuvent constituer des moments de référence pour l'élaboration des prévisions à plus grande anticipation.

Pour les intervalles étendus entre les dates de l'enregistrement de la température de l'eau de 3°, 2,5°, 2° et 1° et les dates de formation de la prise du fleuve on a analysé, dans le cas des stations hydrométriques Cernavoda et Tulcea, les variations de la température de l'eau, de la température de l'air et aussi l'évolution des débits de l'eau. Dans l'analyse qui a conduit à la détermination de la relation:

$$N = f(\bar{t}, \bar{Q}, \tau)$$

pour  $\tau = 3^\circ\text{C}/2,5^\circ\text{C}/1,5^\circ\text{C}/0,5^\circ\text{C}$ , on a utilisé les notations suivantes:

- N = nombre de jours de l'intervalle;
- $\bar{t}$  = température moyenne journalière négative de l'intervalle;
- $\bar{Q}$  = débit moyen journalier de l'intervalle;
- $\tau$  = température de l'eau pour laquelle on a élaboré la prévision (température de prévision)

Etant donné le fait qu'on n'a pas eu la possibilité de contrôler la validité des éventuelles hypothèses physiques concernant le mécanisme de formation de la prise du fleuve, on a essayé d'obtenir des corrélations empiriques entre les séries de données dont on a disposé.

Le grand intervalle de variation de débits d'eau (Q) pour lequel on a effectué des mesurages portant sur la température de l'eau (t eau) et de l'air (t air) de la période qui précède la glace (N) et, d'autre part, le nombre réduit des valeurs de corrélation et l'absence des données à la limite de variation des valeurs t et N, ont constitué les principales difficultés dans l'établissement de la relation de prévision.

C'est ainsi que l'obtention d'une fonction de prévision satisfaisante a entraîné l'élaboration d'une analyse de corrélation complexe, à plusieurs étapes, de telle manière qu'on puisse utiliser toute information concernant la formation et les conditions de formation de la prise du fleuve. Les six pas de l'analyse qu'on présente ensuite de a) à f), peuvent être appliqués d'une manière identique pour d'autres sections du Danube, sauf les deux (Tulcea et Cernavoda) qu'on y a abordées:

a) On a sélectionné des échantillons des valeurs ( $N_i, \bar{t}_i$ ), chacun d'entre eux étant associé à la valeur de la température de prévision:  
 $\bar{t} = 3^\circ/2,5^\circ/2^\circ/1,5^\circ/1^\circ/0,5^\circ\text{C}.$

b) On a supposé que les débits pour lesquels on a effectué les mesurages  $t_i, N_i$  représentent un facteur aléatoire. Pour chaque échantillon on a calculé le débit moyen:

$$\bar{Q}_{med} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{Q}_i$$

où  $n$  représente le nombre de valeurs de l'échantillon.

c) Par corrélation on a établi une fonction  $g(t)$  pour chaque échantillon, donc pour un para-

mètre de prévision  $\tau$  et pour un débit moyen  $Q$  figés. Pour déterminer cette fonction on a été intéressé par:

- la forme de la courbe empirique par le dessin du graphique ( $N_i, t_i$ )
- conditions limite  $C_1$  et  $C_2$  de nature physique à savoir:  $C_1$ : quand la température moyenne journalière  $t$  tend vers 0, le nombre de jours jusqu'à la gelée tends asymptotiquement vers l'infini

$$\bar{t}^- \rightarrow 0 \rightarrow N \rightarrow \infty$$

$C_2$ : il y a température (moyenne journalière) finie pour laquelle la glace se produit quasi instantanément:

$$N = 0 \rightarrow \bar{t}^- = \bar{t}; \bar{t} \text{ fini}$$

On a proposé plusieurs fonctions qui, en principe, correspondent à la forme des courbes empiriques. La seule courbe qui a suivi d'une manière satisfaisante les données empiriques du coefficient de corrélation  $\rho > 0,700$ , pour toutes les six températures de prévision ( $\tau = 3,0^\circ\text{C} / \tau = 2,5^\circ\text{C} / \tau = 2,0^\circ\text{C} / \tau = 1,5^\circ\text{C} / \tau = 1^\circ\text{C} / \tau = 0,5^\circ\text{C}$ ) a été une exponentielle:

$$g(t) = A_0 e^{K\bar{t}^-} \quad (1)$$

où  $A_0$  et  $K$  sont des coefficients déterminés par le graphique de corrélation:

$$\ln g(t) = \ln A_0 + K\bar{t}^-$$

où  $g(\bar{t}^-)$  - représente le nombre de jours jusqu'à l'apparition de la prise du fleuve ( $N$ )

$\bar{t}^-$  - représente la moyenne journalière de la température de l'air (valeurs négatives).

Mais l'exponentielle (1) ne respecte pas la condition de limite  $C_2$ . De plus, les données d'observation à la limite de variation des valeurs  $t$  et  $N$  pour  $t=0$  manquent; donc dans la zone-même où l'exponentielle (1) ne respecte pas la condition à limite  $C_2$ . Ce fait explique d'ailleurs l'existence de certains coefficients de corrélation élevés bien qu'on ne respecte pas les restrictions de nature physique. Ensuite, on a procédé à la corroboration de l'information empirique et de celle donnée par les conditions à limite, en proposant une fonction à deux termes:

$$f(\bar{t}^-) = g(\bar{t}^-) + h(\bar{t}^-) \quad (2)$$

de telle manière que:

- (1)  $g(\bar{t}^-)$  diffère de  $f(\bar{t}^-)$  sous la limite des erreurs de mesurage dans le domaine de température où on a des mesurages. Autrement dit,  $g(\bar{t}^-)$  englobe l'information empirique.
- (2)  $h(\bar{t}^-)$  diffère de  $f(\bar{t}^-)$  sous la limite des erreurs de mesurage dans le domaine de température où  $\bar{t}^-$  prend des valeurs rapprochées à 0, domaine où on n'a pas de mesurages mais où on connaît que  $f(\bar{t}^-)$  tend asymptotiquement vers 0. Autrement dit,  $h(\bar{t}^-)$  englobe une information théorique, introduite par la dépendance

$$h(\bar{t}^-) = \frac{\beta_0}{\bar{t}^-} \quad (3)$$

où le coefficient  $\beta_0$  est obtenu suite à la condition que la fonction  $f(\bar{t}^-) = g(\bar{t}^-) + h(\bar{t}^-)$  passe près de derniers points  $N_i, t_i$  des graphiques empiriques.

Suite aux relations (1), (2) et (3) il résulte que

$$f(\bar{t}^-) = A_0 \cdot e^{k\bar{t}^-} - \frac{\beta_0}{\bar{t}^-} \quad (4)$$

d) On a proposé une dépendance de forme:

$$g(\bar{t}^-) \sim \sqrt{\bar{Q}}$$

Par suite de cette dépendance, la relation (4) a été écrite sous la forme:

$$f(\bar{t}^-) = A \sqrt{\bar{Q}} \cdot e^{K\bar{t}^-} + \frac{\beta_0}{\bar{t}^-} \quad (5)$$

à l'aide de laquelle on a tracé pour tout l'échantillon, les graphiques  $f(\bar{t}^-)$  pour le débit moyen de l'échantillon ( $\bar{Q}$ ), le débit maximum ( $\bar{Q}_{\max}$ ) et le débit minimum de l'échantillon ( $\bar{Q}_{\min}$ ). La dispersion des points empiriques dans le champ des trois graphiques constitue une indication pour le degré d'adéquation de la formation (5).

e) On a effectué une série d'opérations (a)-(d) pour toutes les températures de prévision:

$\tau_i = 1, \dots, 6$ , en obtenant six fonctions  $f_i(\bar{t}^-, \bar{Q})$ .

f) Pour obtenir une fonction aux paramètres  $\bar{t}^-$ ,  $\bar{Q}$  et  $\tau$  on a procédé à une corrélation des coefficients des six fonctions  $f_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ , en déduisant une fonction générale:

$$f(\bar{t}^-, \bar{Q}, \tau)$$

Le type d'analyse décrit aux points (a) - (f) a été utilisé dans le cas des mesurages effectués aux stations hydrométriques Tulcea et Cernavoda. On a déterminé les fonctions:

$$N_\tau = f_\tau(\bar{t}^-, \bar{Q}, \tau) = (0,145\tau + 0,201) \cdot \sqrt{\bar{Q}} \cdot e^{-(0,013\tau + 0,075) \cdot \bar{t}^-} + \frac{3,76 - 0,850\tau}{\bar{t}^-} \quad (6)$$

$$N_c = f_c(\bar{t}^-, \bar{Q}, \tau) = (0,245\tau + 0,095) \cdot \sqrt{\bar{Q}} \cdot e^{-(0,0089\tau + 0,1062) \cdot \bar{t}^-} + \frac{3,76 - 0,850\tau}{\bar{t}^-} \quad (7)$$

Dans les figures 1 et 2 on présente le graphique des relations de prévision  $N = f(\bar{t}^-, \bar{Q})$  pour  $\tau = 3,0^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 2,5^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 2,0^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 1,5^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 1,0^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 0,5^\circ\text{C}$ , obtenues aux stations hydrométriques Cernavoda (1) et Tulcea (2).

L'analyse de ces graphiques met en relief tout d'abord la similitude des courbes de relation correspondant aux trois types de débits  $\bar{Q}_{\text{moy}}$ ;  $\bar{Q}_{\text{max}}$ ;  $\bar{Q}_{\text{min}}$  pour des températures moyennes journalières négatives de l'air se situant sous la valeur de  $-11^\circ$  ( $t_{\text{air}} = -11^\circ$ ;  $-15^\circ$ ). On peut déduire que l'influence du débit diminue simultanément avec la diminution de la température de l'air. Dans la condition où le débit joue le rôle d'un facteur aléatoire, on peut espérer dans une amélioration de la prévision dans l'intervalle des températures les plus basses. L'analyse a démontré que pour certaines températures négatives de l'air, dans la proximité immédiate de  $0^\circ$ , la prise du fleuve ne se produit plus, bien que la période à telles températures soit de durée, ce qui signifie qu'il y a une certaine température critique nécessaire à la formation de la prise du fleuve.

Les relations (6) et (7) font possible la définition d'une température critique en donnant à  $N$  la valeur maximale possible, i.e. le nombre maximum de jours de l'intervalle où apparaît la possibilité de la formation de la prise du fleuve, étant d'environ 90 jours.

Il en résulte une température critique située entre  $-0,1^{\circ}$  et  $-0,2^{\circ}$  ce qui concorde aussi avec les données dont on disposait.

Les coefficients élevés de corrélation qui en résultent, attestent la correction des données principales ainsi que la valabilité des fonctions prises en considération.

Ainsi, on peut considérer que ces relations peuvent s'avérer utiles pour la prévision de la formation de la prise du fleuve dans le cas des prévisions correctes sur l'évolution de la température de l'air et des débits d'eau.

Pour l'opérativité de l'élaboration de la prévision de la date de formation de la prise du fleuve on peut utiliser directement les relations graphiques.

En ce qui concerne la précision de la prévision de la date de formation de la prise du fleuve au cas où on utilise les relations présentées, on doit souligner aussi le fait que cette précision sera d'autant plus grande que la période d'anticipation sera plus courte en concordance avec la précision des prévisions météo, plus précises pour des périodes de temps plus courtes.

La précision sera donc plus grande dans le cas où la prévision de la formation de la prise du fleuve sera faite à partir du moment de l'enregistrement de certaines températures de l'eau seulement de  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $1,5^{\circ}\text{C}$ , maximum  $2^{\circ}\text{C}$ . Verifiant les relations graphiques de la prévision il en ressort qu'à partir de l'enregistrement de ces températures de l'eau à la station hydrométrique Tulcea par exemple (fig.2), jusqu'à la formation de la prise du fleuve il reste seulement

5 ou 7 jours et la température de l'air reste constamment négative:  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-6^{\circ}\text{C}$  les débits d'eau restent inférieurs à la valeur de  $1000 \text{ m}^3/\text{S}$ .

Les relations nous indiquent aussi une plus grande précision de la prévision de la formation de la prise du fleuve dans la situation où on a des températures de l'air fort diminuées, inférieures à  $-10^{\circ}$ ,  $-12^{\circ}$  pour toutes les catégories de débit.

## Bibliographie

1. C. Diaconu - Possibilités de prévision des niveaux dans les conditions d'existence de la prise du fleuve sur le Danube.  
La IIIème Conférence internationale portant sur les prévisions hydrologiques des pays danubiens. Bucarest, 1965.
2. D. Dumitrescu - La prévision à longue échéance portant sur l'apparition de la prise du fleuve et du débâcle sur le Danube.  
La VIIème Conférence portant sur les prévisions hydrologiques des pays danubiens Regensburg, 1975 (Konferenzbericht Koblenz, 1977).
3. P. Mita - Possibilités de prévision de l'apparition et de l'évolution de la prise du fleuve sur le Danube inférieur  
La Vème Conférence portant sur les prévisions hydrologiques des pays danubiens. Belgrad, 1969 (Zbovnic dokladov, Belgrad, 1970).
4. P. Mita - Méthode de prévision de l'apparition de la prise du fleuve influencé par la température de l'air et le débit d'eau.

La VIIème Conférence portant sur les prévisions hydrologiques des pays danubiens.

Regensburg, 1975 (Konferenzbericht, Koblenz 1977).

5. P. Mita  
G. Andreescu - On ice bridge phenomenon occurrence on the Danube.  
XIII Conference of the Danube countries on hydrological forecasts. Belgrad, 1986
  
6. M. Podani - Les glaçons sur le Danube durant l'intervalle janvier-mars 1985  
Genèse, effets, mesures et conclusions, Hidrotechnica, vol.30 nr.7, 1985, Bucuresti

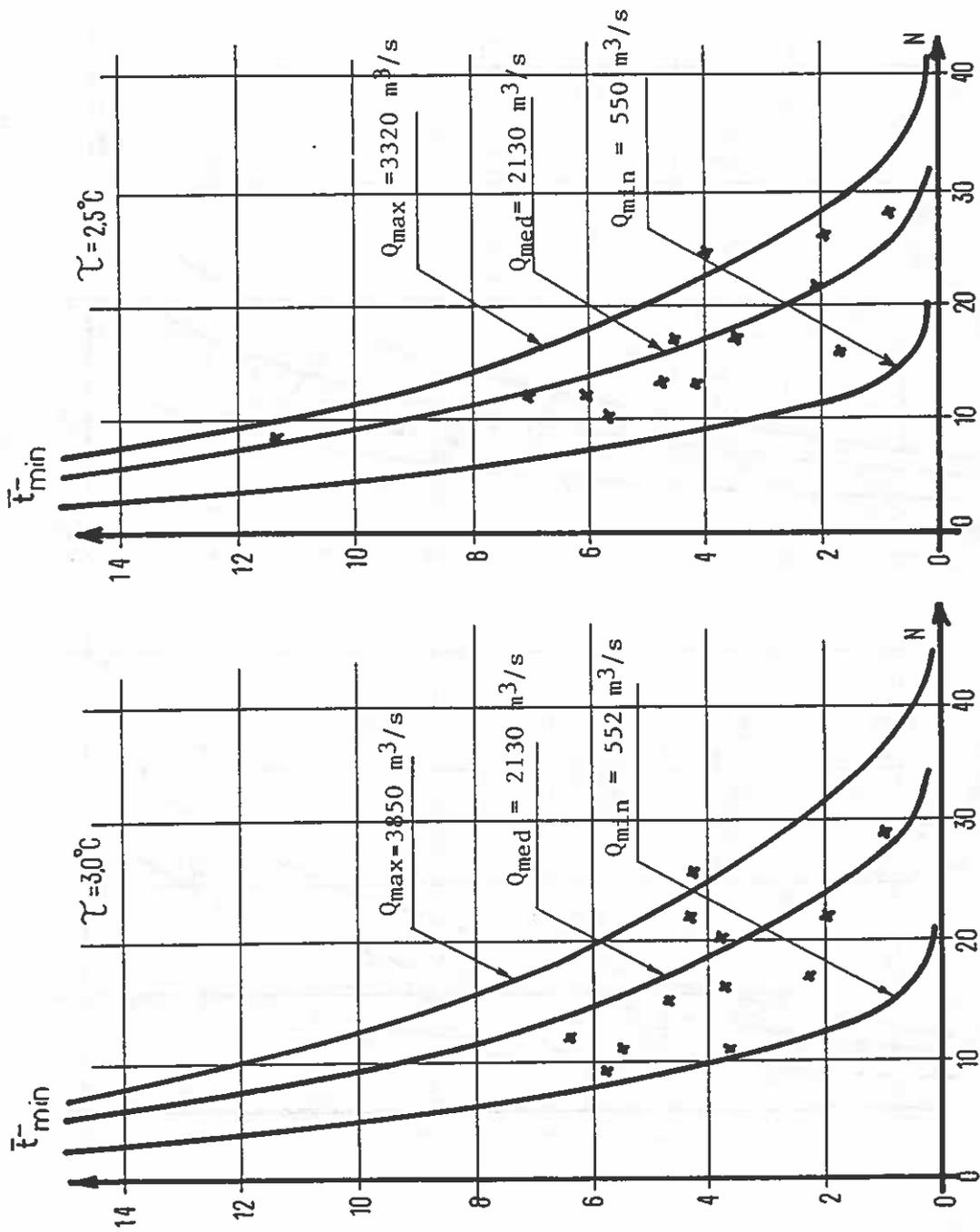


Fig. 1a- La relation  $N = f(\bar{t}_{\min})$  pour la s.h. Černavoda

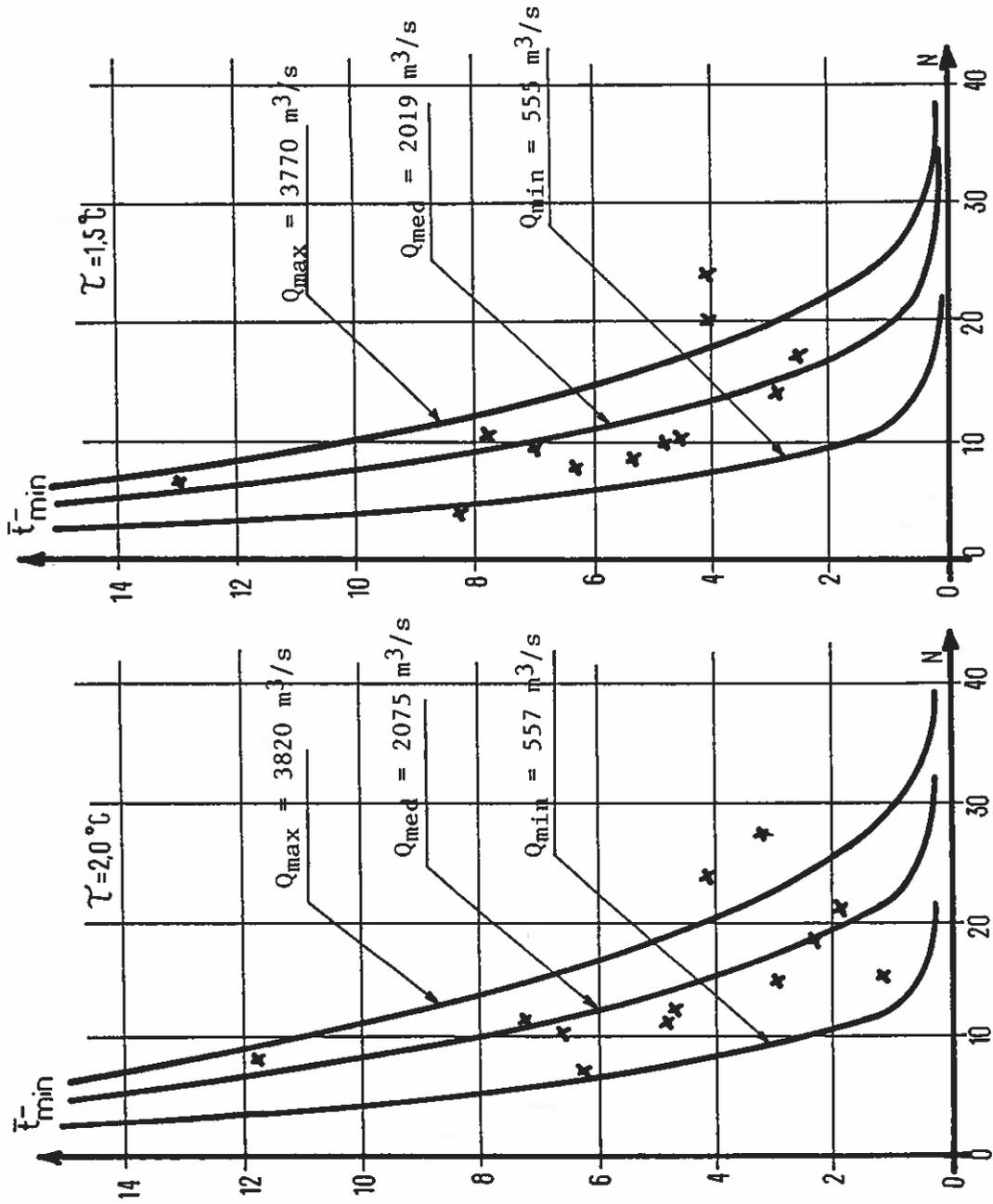
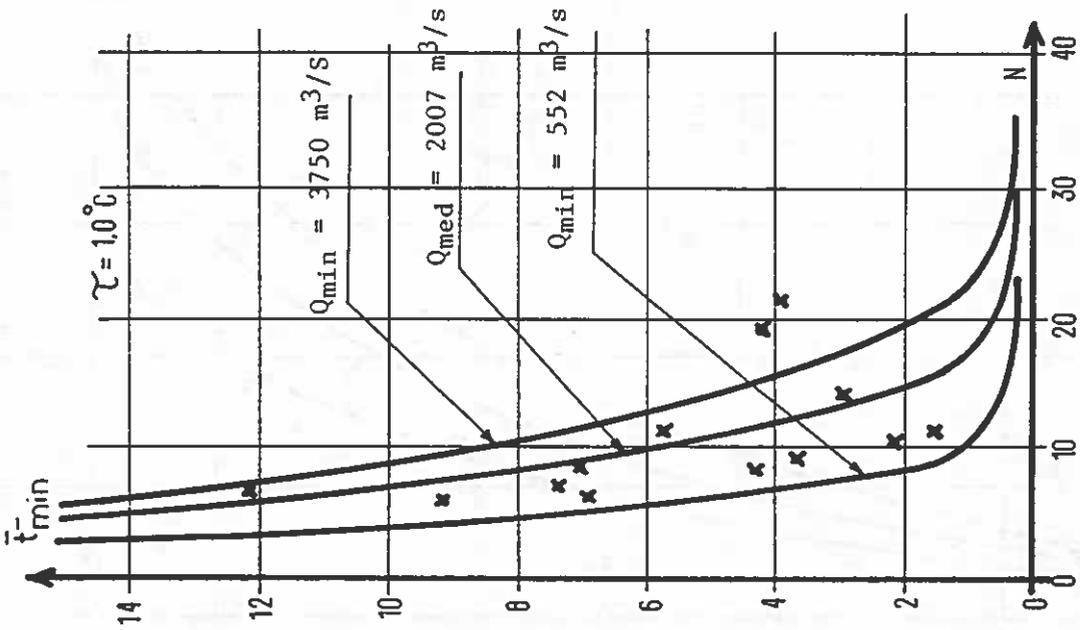
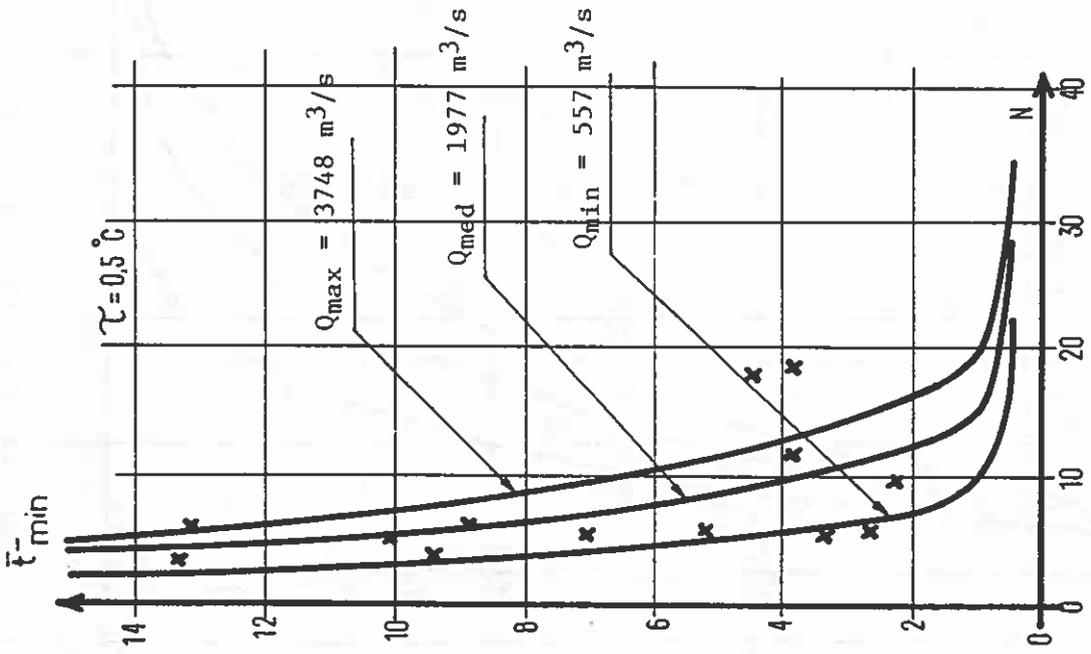


Fig. 1b - La relation  $N = f(\bar{t}_{\min})$  pour la s.h. Černavoda



Suite de la figure 1b

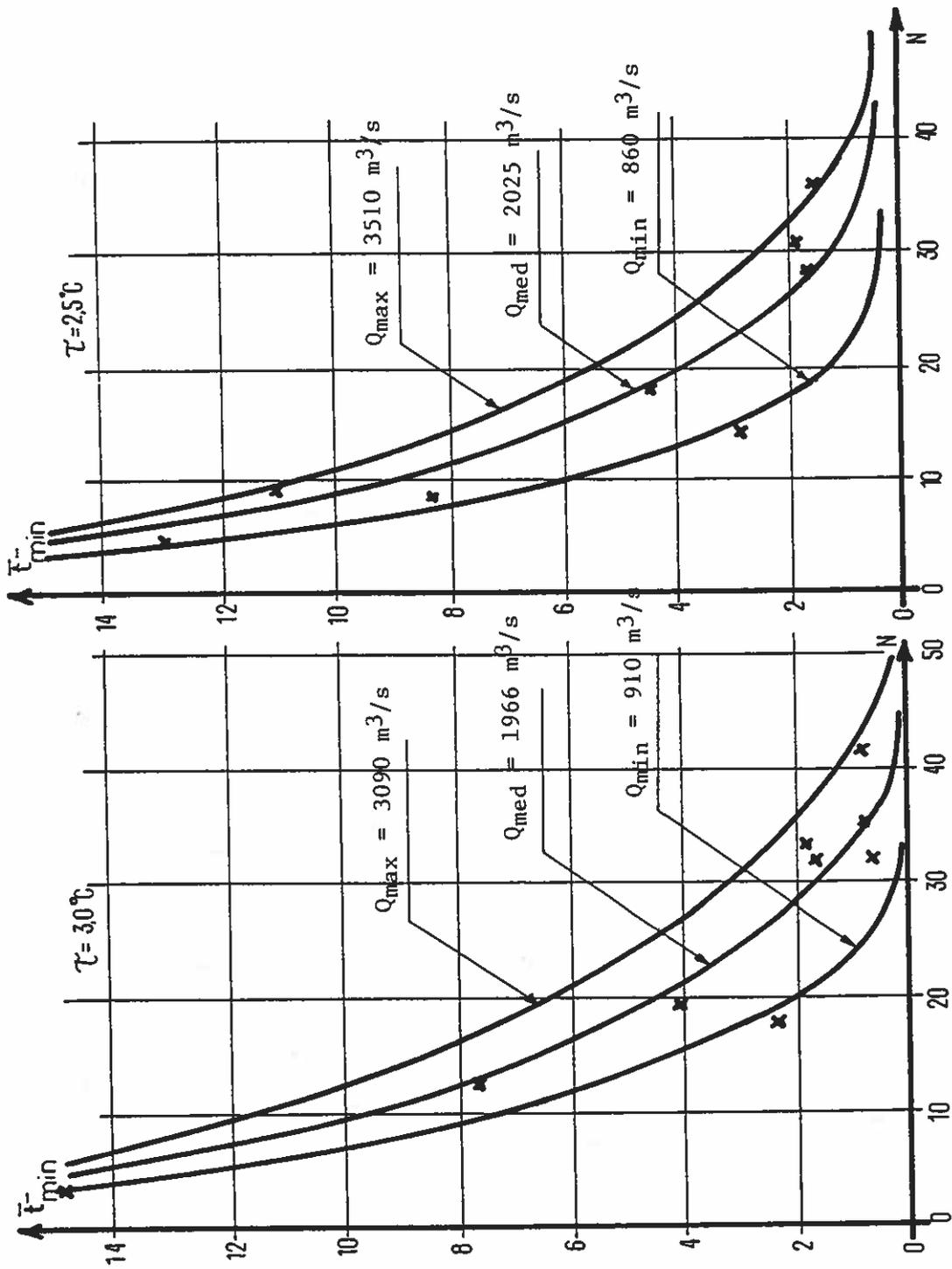


Fig. 2a - La relation  $N = f(\bar{t}_{min})$  pour la s.h. Tulcea

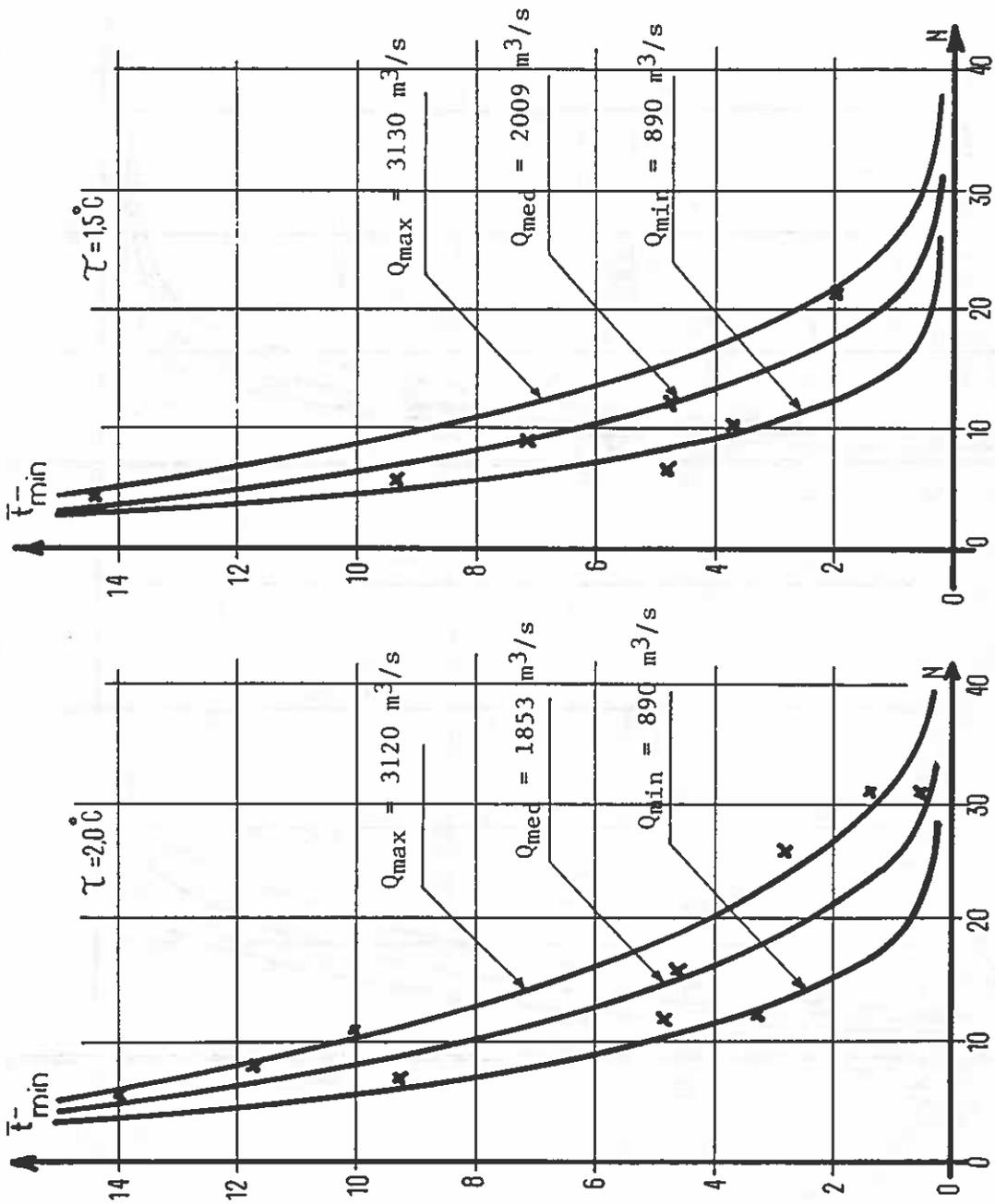
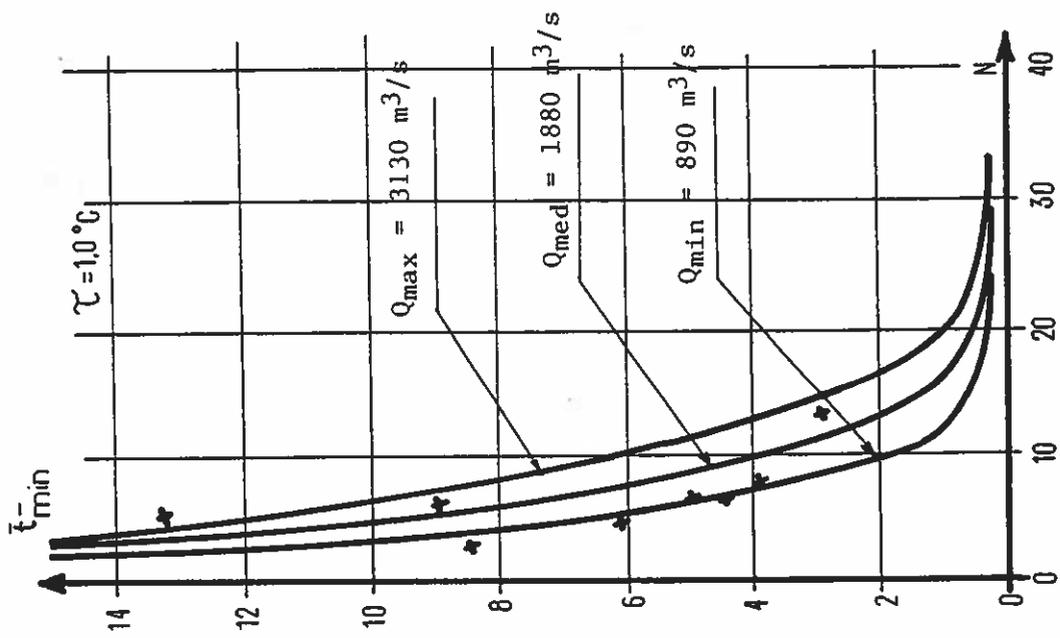
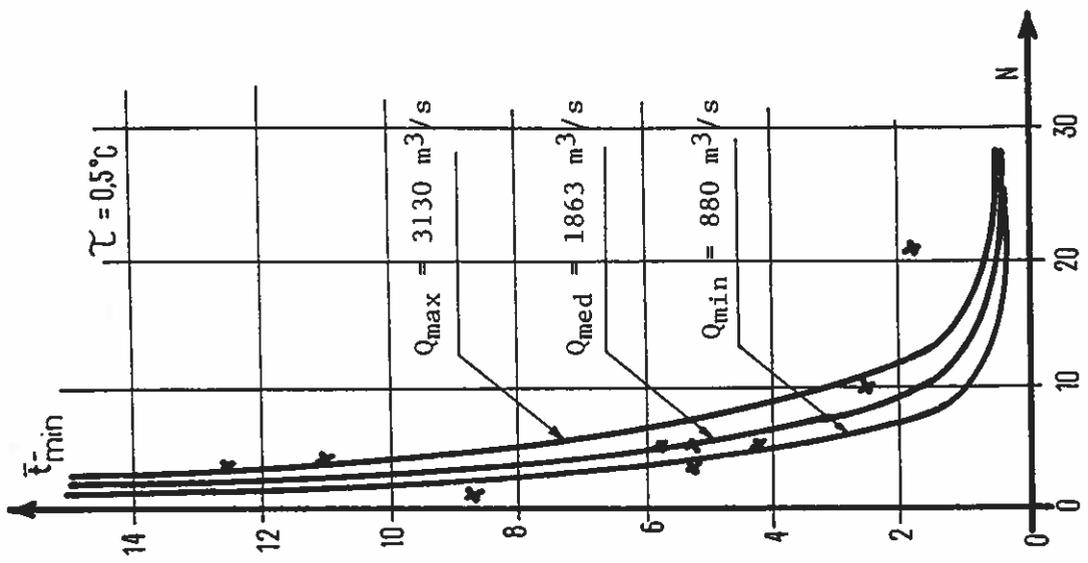


Fig. 2b - La relation  $N = f(t_{\min})$  pour la s. h. Tulcea



Suite de la figure 2b

#### 4.3.4.8 En Union des Républiques Socialistes Soviétiques

##### Méthode de prévision à courte échéance de la date de la prise du fleuve sur le Bas-Danube Chtcherbak A.V. (URSS)

Les recherches portant sur l'élaboration des méthodes de prévision à courte échéance de la date de la prise du fleuve sur le secteur soviétique du Danube ont été poursuivies à l'Institut de recherches scientifiques régional d'Ukraine du Comité d'Etat hydrométéorologique de l'URSS, par A.V. Chtcherbak, en 1973-1974 et 1983-1984, en divers points et sections du Bas-Danube.

L'essence de la méthode. Les bases de la méthode de calcul du début de la prise du fleuve pour les besoins de la prévision à courte échéance ont été élaborées par V.D. Komarov et L.G. Choulakovski (Hydrométcentre URSS)). L'essence de la méthode se résume en ce qui suit:

L'arrêt des plaques de glace sur un secteur ne conduit pas toujours au commencement de la formation de bandes de glaces. Pour que les plaques de glace arrêtées se soudent et forment des bandes, ce qui signifie le commencement de la prise du fleuve, il faut que le gel soit intense, c'est-à-dire que la température de l'air durant cette période soit suffisamment basse. La température d'air au-dessus de laquelle il ne se produit pas de soudage stable des plaques de glace et ne se forment pas des bandes de glace, est appelée température critique ( $\Theta_{kp}$ ).

Ainsi pour le commencement de la prise du fleuve sur un secteur, deux conditions doivent être remplies, à savoir: (1) les conditions d'émis-

sion de chaleur requises doivent exister et  
 2) la température de l'air après la réalisation de la première condition ne doit pas être supérieure à la température critique.

On utilise en qualité de caractéristique relative de l'émission de chaleur, la somme des températures d'air moyennes journalières négatives ( $\sum \theta_-$ ). Lors de l'établissement des relations morphométriques et hydrauliques locales, les conditions qui influent sur les valeurs  $\sum \theta_-$  et  $\theta_{kp}$  sont fonction de la valeur du niveau d'eau. La date du début de la prise du fleuve sur un secteur donné est calculée selon les relations suivantes:

$$(\sum \theta_-)_{\min} = f(H_{pr}) \quad (1)$$

$$\theta_{kp} = \varphi(H_{pr}) \quad (2)$$

où ( $\sum \theta_-$ ) = somme minima des températures d'air moyennes journalières négatives requise pour le commencement de la prise du fleuve;  $H_{pr}$  = niveau d'eau précédant la prise du fleuve. La valeur de cette dernière formule est en général la valeur au jour de l'apparition de glaces flottantes.

Il est à relever que l'introduction dans le calcul de la valeur variable  $\theta_{kp}$  établie selon (2) est particulièrement nécessaire dans les régions où le régime des températures d'air négatives est instable dans la période automne-hiver.

La figure 1 présente la relation pour la détermination des valeurs des sommes des températures d'air négatives nécessaires pour l'arrêt de la couche de glace sur le secteur soviétique du Danube et de la valeur de la température d'air critique en fonction du niveau d'eau sur

le Danube à Réni le jour de l'apparition de glaces flottantes sur le secteur.

Le calcul des dates de la prise du fleuve sur le secteur considéré en faisant appel aux relations obtenues donne des résultats satisfaisants, à savoir: dans les 95% des cas de prévision de contrôle l'erreur ne dépasse pas 1 jour et dans les 100% des cas, l'erreur admise est de 2 jours. Cette méthode a donné des résultats analogues dans la pratique opérative de l'Observatoire danubien d'hydrométéorologie.

Toutefois, malgré les résultats satisfaisants les relations obtenues ne peuvent être considérées comme stables car elles sont fondées sur des matériaux de base très restreints.

Tenant compte de ce fait, des essais ont été entrepris afin d'éclaircir les possibilités qu'offrirait, pour le calcul du commencement de la prise du fleuve sur le Bas-Danube, l'utilisation des relations calculées, communes pour divers fleuves. La méthode de détermination de ces relations a été élaborée par L.G. Choulavski qui, pour ce faire, a utilisé les données de mesure et d'observation sur divers secteurs des fleuves Volga, Ob, Kama, Beloï.

A l'issue de l'analyse du processus de formation des bandes de glace, des forces et des intensités qui agissent dans ce processus ainsi que de leur dépendance des conditions météorologiques, des caractéristiques morphométriques et hydrauliques du cours d'eau, Choulavski a établi les facteurs fondamentaux déterminant les valeurs de la somme d'émission de chaleur indispensable pour le commencement de la prise du fleuve

$$\beta \Sigma \Theta_- = f(u, b, L, \vartheta_{\pi}, g) \quad (3)$$

et la température d'air critique

$$\Theta_{\text{кр}} = \varphi(u, b, \vartheta_A, \vartheta_{\pi}, g, \frac{\partial \vartheta_B}{\partial \Theta}) \quad (4)$$

où  $\beta \Sigma \Theta_-$  = caractéristique approximative de la somme de l'émission de chaleur;  $\beta$  = coefficient au poids  $\text{QL}^{-2}\text{T}^{-1}\text{C}^{-1}$  auprès du poids  $\Sigma \Theta_-$  = à TC;  $u$  = vitesse moyenne du courant en m/s;  $b$  = largeur du fleuve en mètres;  $L$  = chaleur spécifique de la formation de glace;  $\vartheta_A$  et  $\vartheta_{\pi}$  épaisseur de la glace et de la lame d'eau  $\frac{\partial \vartheta_B}{\partial \Theta}$  = modification de la solidité de la glace accompagnée d'un changement de la température de l'air;  $g$  = accélération de la force de pesanteur.

L'analyse du poids de ces valeurs montre que les relations 3 et 4 peuvent être présentées dans la forme des relations suivantes entre des combinaisons de ces valeurs sans poids.

$$\frac{\beta \Sigma \Theta_-}{L \vartheta_{\pi} b} = f\left(\frac{u^2}{g b}\right), \quad (5)$$

$$\frac{\Theta_{\text{кр}} \frac{\partial \vartheta_B}{\partial \Theta}}{b \vartheta_B} = \varphi\left(\frac{u^2}{g b}\right). \quad (6)$$

Lors du calcul des dites combinaisons on utilise les mesures et les valeurs suivantes:

$\beta = 20 \text{ cal/cm}^2 \text{ jour degré}$ ;  $L = 80 \text{ cal/g}$ ;  $\vartheta_{\pi} = 0,913 \text{ g/cm}^3$  et  $\frac{\partial \vartheta_B}{\partial \Theta} = 1 \text{ kg/cm}^2 \text{ degré}$ .

En faisant appel aux expressions analytiques des lignes des relations 5 et 6 ont été obtenues les formules pour le calcul de la somme des températures d'air moyennes journalières négatives requises pour le commencement de la prise du fleuve.

$$\sum \Theta_{-} = -10,3 u^{1,22} \cdot b^{0,39} \quad (7)$$

et de la température d'air critique

$$\Theta_{kp} = -0,65 u \cdot b^{0,5} \quad (8)$$

Lorsqu'il y a plusieurs profils de jauge hydro-métriques sur le secteur donné, il est recommandé de déterminer les valeurs de la vitesse du courant et de la largeur du fleuve d'après le profil de jauge ayant les plus petites valeurs selon les graphiques des relations  $u=f(H)$  et  $b=\varphi(H)$  pour la période libre de glaces.

Les valeurs des expressions 5 et 6 portées sur le graphique et obtenues d'après les données de mesurage sur le secteur soviétique du Danube, ont été accordées avec la grille des points obtenus pour d'autres fleuves de plaine de l'URSS. Ceci permet de recommander les formules 7 et 8 pour le calcul du commencement de la prise du fleuve sur le secteur soviétique du Danube. De plus, dans les 90% des cas de prévision de contrôle l'erreur ne dépasse pas 1 jour et dans les 100% des cas, l'erreur admise est de 2 jours.

Schéma de la formulation de la prévision. La prévision à courte échéance de la date du commencement de la prise du fleuve sur le secteur soviétique du Danube est établie au jour de

l'apparition des glaces d'après les données de l'une des quatre stations hydrométriques de ce secteur (Réni, Ismaïl, Kilia, Vilkovo) par deux moyens:

1. d'après les relations locales de la figure 1. La somme minima des températures d'air moyennes journalières négatives  $(\sum \theta_-)_{\min}$  requise pour la prise du fleuve et la température d'air critique  $\theta_{kp}$  sont reprises de ladite figure en fonction du niveau d'eau  $H$  à la station hydrométrique Réni le jour de l'apparition des glaces;
2. d'après les relations communes pour divers fleuves - formules 7 et 8. La vitesse de courant  $u$  et largeur de fleuve  $b$  nécessaires pour déterminer la somme de température négative de l'air et la température d'air critique sont reprises des graphiques respectifs en fonction du niveau de l'eau du Danube à Réni, le jour de l'apparition des glaces sur le secteur. Les dates des sommes  $(\sum \theta_-)_{\min}$  et  $\theta_{kp}$  déterminées d'après la figure 1 et calculées selon les formules 7 et 8 sont établies sur la base de la prévision de la température de l'air.

Comme date pronostiquée du commencement de la prise du fleuve est prise la date d'apparition de la température d'air critique après l'accumulation des  $(\sum \theta_-)_{\min}$  nécessaires pour la prise du fleuve. L'échéance de la prévision est de 3 à 5 jours; l'erreur admise est de 2 jours.

Pour les autres secteurs du Bas-Danube, lors de la formulation des prévisions à courte échéance du commencement de la prise du fleuve on peut avoir recours, pour la détermination de

$(\sum \Theta_{-})_{\min}$  et de  $\Theta_{kp}$  à des relations analogues à celles de la figure 1, construites selon les données d'observations de tel ou tel secteur du Danube.

Pour le secteur Svistov-Silistra, on peut utiliser comme relation prévisionnelle pour l'établissement de la date du commencement de la prise du fleuve, la relation entre les dates de la prise du fleuve sur ce secteur et dans le bras de Kilia, à Ismail indiquée sur la figure 2. Le commencement probable de la prise du fleuve sur le secteur Svistov-Silistra est déterminé d'après la date effective de la prise du fleuve à Ismail et la valeur du niveau d'eau à cette date sur le Danube à Réni. L'échéance moyenne de la prévision est de 6 jours et l'erreur admise, de 3 jours.

Les résultats des recherches pour l'élaboration de la méthode de prévision à courte échéance du commencement de la prise du fleuve sur le Bas-Danube sont publiés dans les oeuvres de U<sub>KR</sub> NIGMI 1975, fasc, 135, pages 117-123.

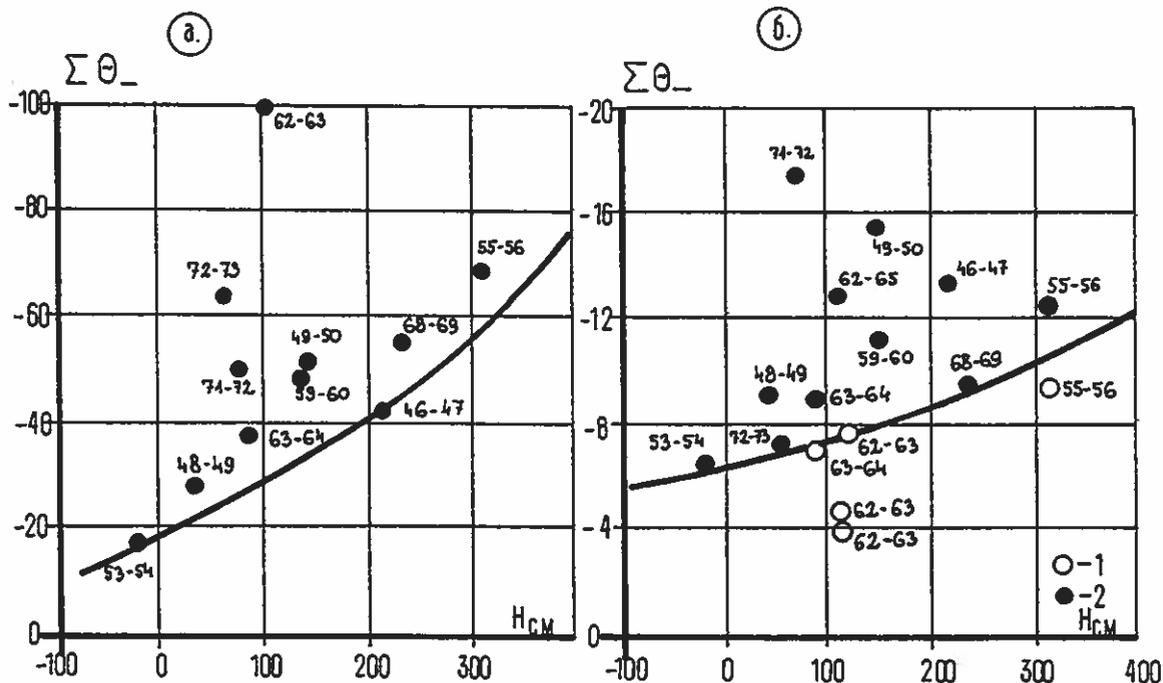


Figure 1 - Relation de la somme minima des températures d'air moyennes journalières négatives ( $\Sigma\theta_{-}$ )<sub>min</sub> requises pour la prise du fleuve sur le secteur Réni-Vilkovo (a) et de la température critique de l'air  $\theta_{kp}$  (b), du niveau d'eau sur le Danube à Réni, le jour de l'apparition des glaces flottantes.

1. Température de l'air après l'accumulation ( $\Sigma\theta_{-}$ )<sub>min</sub> qui est insuffisante pour la prise du fleuve
2. Température de l'air après l'accumulation ( $\Sigma\theta_{-}$ )<sub>min</sub> qui est suffisante pour la prise du fleuve.

D Svistov  
Silistra

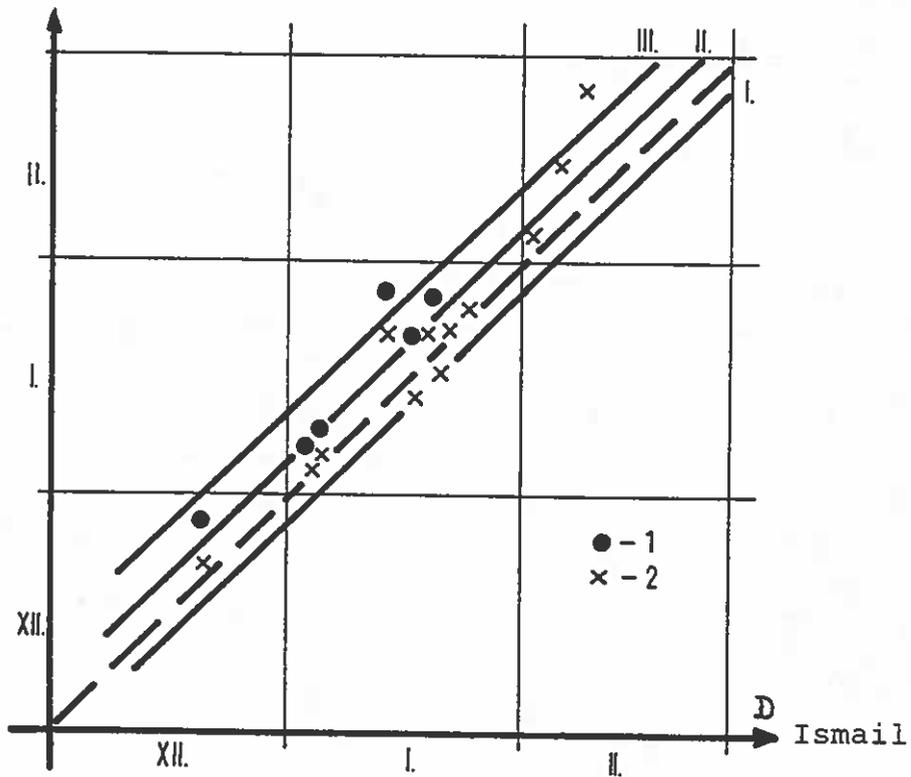


Figure 2 - Relation entre les dates de la prise du fleuve sur le Danube à Svistov, Silistra et Ismail compte tenu des valeurs des niveaux d'eau lors de la prise du fleuve à Ismail.

1. Svistov, 2. Silistra

I-H = 300 cm, II-H = 100-300 cm, III-H = 100 cm