L'hydrologie du Rhin à l'aval de Bâle

LE RHIN ENTRE BALE ET EMMERICH

Hydrological features of the Rhine downstream from Basle

THE RHINE BETWEEN BASLE AND EMMERICH

PAR W. ESCHWEILER

OBERREGIERUNGSBAURAT IN DER BUNDESANSTALT FÜR GEWAESSERKUNDE, KOBLENZ

Le Danube supérieur pénètre profondément dans le bassin de réception du Rhin et, au moment des basses eaux, apporte toutes ses eaux au Rhin. Etant donné que les différentes parties du bassin du Rhin sont situées, et dans les montagnes, et près de la mer, les facteurs climatiques présentent d'importantes différences qui seront commentées chacune séparément. Le rythme de pente des fleuves — pente raide dans le cours supérieur, la forme parabolique tendant vers une pente plate dans le tronçon de l'embouchure —, se retrouve trois fois dans le cours du Rhin : 1. Rhin alpin/lac de Constance; 2. Lac de Constance/Bingen; 3. Bingen/embouchure. Le débit du Rhin est bien équilibré grâce à l'action combinée des hautes montagnes qui fournissent des apports d'eau assez importants en été, et des montagnes moyennes fournissant de gros apports en hiver. Les différentes crues survenues en ce siècle sont traitées de manière détaillée en donnant une attention particulière à la crue de 1925/26. Le fleuve se prend et charrie ses glaces toujours aux mêmes endroits : à la Lorelei et à la limite des marées. Une représentation graphique montre pour chaque hiver l'ampleur atteinte par la couche de glace solide. En terminant, l'auteur décrit l'œuvre du Service Hydrologique et donne une vue d'ensemble sur les niveaux de l'eau et les écoulements caractéristiques aux principales stations limnimétriques.

The upper Danube penetrates deeply into the Rhine's catchment area into which it discharges the whole of its flow during low water periods. Climatic conditions in the various parts of the Rhine basin are very different, being conditioned by the proximity or otherwise of the various areas to the sea or the mountains; these variations are discussed individually by the Author. The slope of the rivers is steep in the upper reaches and then gradually falls off parabolically towards the river mouth, where it becomes very flat. It follows a cycle that repeats itself three times, as follows: 1. Alpine Rhine/lake Constance; 2. Lake Constance/Bingen; 3. Bingen/river mouth. The discharge of the Rhine is very even, because of the way in which the large amounts of water supplied by the high mountains during the summer are compensated by the inflow from mountains in the medium height range, which reaches a maximum in the winter. The individual floods records in the present century are considered in more detail, with particular emphasis on the 1925/26 case. The river always freezes up and moves ice at the same places, i.e. at the Lorelei and at the head of the tide. The extents of the completely icebound reaches during the various winters concerned are shown on a graph. The Author concludes with a description of the work carried out by the Hydrological Department and a general view of the characteristic water levels and discharges at the main level recording stations along the Rhine.

1. — LE BASSIN DE RÉCEPTION

M.E. Walser a déjà donné des précisions sur le bassin de réception du Rhin à l'amont de Bâle, et en particulier sur sa partie suisse, dans l'article précédent.

Après Bâle, le Rhin cesse de se diriger vers l'ouest, s'orientant vers le nord par la large basse-plaine du Rhin-Supérieur, limitée d'un côté par les Vosges et de l'autre par la Forêt-

SIGNIFICATION DES DIFFÉRENTS SYMBOLES.

- NNW = Niveau de basses eaux (moyenne journalière) *le plus bas* qui soit généralement connu ou ait été observé.
- MNW = Niveau de basses eaux moyen : moyenne arithmétique obtenue à partir des moyennes journalières les plus basses des niveaux d'eau des années individuelles au cours de la période envisagée.
- MW = Niveau d'eau moyen : moyenne arithmétique des niveaux d'eau journaliers pendant la période indiquée.
- MHW = Niveau de hautes eaux moyen : moyenne arithmétique des niveaux d'eau les plus élevés des années individuelles pendant la période indiquée.
- HHW = Niveau de hautes eaux, le plus élevé qui soit généralement connu ou ait été observé.
- NN = Cote zéro du nivellement général allemand.
- NNQ = Débit de basses eaux, le plus bas (moyenne journalière).
- MNQ = Débit de basses eaux moyen : moyenne arithmétique des moyennes journalières les plus basses des débits des années individuelles pendant la période indiquée.
- MQ = Débit moyen pendant toute la période indiquée.
- MHQ = Débit de hautes eaux moyen : moyenne arithmétique des plus forts débits des années individuelles pendant la période indiquée.
- HHQ = Débit de hautes eaux le plus haut qui soit généralement connu.
- Q = Débit en m³/s.
- q = Débit spécifique en l/s par km².

Noire. C'est ici que les apports du Neckar et du Main donnent au Rhin son allure de grand fleuve impressionnant. Le Rheinische Schiefergebirge lui impose une nouvelle orientation provisoire vers l'ouest à partir de Mayence, jusqu'au moment où il parvient à se frayer un passage par ces monts près de Bingen, ce qui lui permet de reprendre son cours vers le nord. Après avoir reçu son affluent principal, la Moselle, à Coblenze, il sort du Mittelgebirge et entre dans la plaine dans la région de Bonn-Cologne, d'où, par un immense lacet, il se dirige finalement une fois de plus vers l'ouest et la mer. Le régime de ce fleuve, sur lequel nous nous appesantirons en détail dans la suite du texte, est caractérisé, même dans la plaine, par les influences spéciales des hautes et moyennes montagnes qui se compensent d'ailleurs en grande mesure.

En ce qui concerne la morphologie du fleuve, il est intéressant de noter que l'ancienne source du Rhin se situait environ dans la région de Kaiserstuhl, tandis que la région au sud de

celle-ci, de même que le « Haut-Rhin » drainaient leurs eaux dans le Rhône, à travers la Porte Bourguignonne [10]. Ce ne fut qu'au début de l'ère diluvienne que le Rhin adopta son orientation et son caractère actuels.

Environ 30 % du bassin de réception du Rhin sont recouverts de forêts. Ce chiffre n'est que de l'ordre de 20 à 25 % pour le Rhin-Inférieur, mais dans le Mittelgebirge, il atteint une moyenne de 30 à 35 %, et le maximum, de plus de 40 %, dans le bassin de la Ruhr. Il n'y a pratiquement plus de région inculte dans le bassin du Rhin, et de loin la plus grande partie du sol est, soit en exploitation agricole, soit transformée en verdure ou en prairies. La culture très étendue de la vigne, qui se pratique jusqu'au Siebengebirge près de Bonn vers le nord, est particulièrement remarquable.

Grâce au caractère de grande voie de communication de ce fleuve, les rives du Rhin ont toujours été parsemées de centres habités florissants depuis la haute antiquité. Pendant le der-

FIG. 1. — LE RHIN

nier siècle, la Ruhr est devenue le centre le plus important d'industrie lourde en Allemagne, et de ce fait la région ayant la plus forte densité de population du pays; c'est ainsi qu'on y trouve aujourd'hui une grande ville (c'est-à-dire plus de 100 000 habitants) coudoyant l'autre. D'autre part, les centres des industries de finition et chimiques se trouvent dans les régions de Stuttgart, de Mannheim, et le long du Main-Inférieur. La densité de population moyenne, des parties du bassin du Rhin situées dans la République Fédérale était de 244 habitants au km² en 1950. Dans la zone administrative de la ville de Düsseldorf, dont fait partie la Ruhr occidentale, on trouve une densité de 786 habitants au km².

La superficie du bassin de réception jusqu'au Waal, c'est-à-dire jusqu'à l'endroit où commence la région du delta proprement dite, est de l'ordre de 160 000 km². La plus grande largeur, de 470 km, n'est pas si éloignée de la longueur du même bassin dans la direction nord-sud, qui est, elle, de 630 km. Cependant, le bassin ne présente pas une superficie fermée et arrondie, étant donné que le bassin versant du Danube-Supérieur pénètre profondément dans celui du Rhin. La distance entre la ligne de partage des eaux à la Porte Bourguignonne d'une part, et la région de la source du Danube n'est que de 90 km. Dans cette zone, le Danube est bien surélevé par rapport à la région fluviale voisine du Rhin (Donaueschingen 687 m, Sigmaringen 565 m, Ulm 461 m; par contre : lac de Constance 395 m, Bâle 252 m). Le sous-sol en calcaire jurassique présente, surtout dans la région d'Immendingen-Möhringen, toute une série d'accidents tectoniques et de failles, qui permettent aux eaux de surface de s'écouler sans difficulté vers les grandes profondeurs. Il n'est donc pas étonnant que le Danube subisse des pertes d'eau très importantes à partir d'Immendingen et jusqu'au point d'infiltration principal (« perte du Danube ») dans le Brühl près de Möhringen, étant donné que la nappe souterraine en ces lieux est à une cote beaucoup plus basse que le lit du Danube (différences pouvant atteindre 8 m). Par un été très sec, il peut même arriver que l'eau du Danube ne parvienne plus

à atteindre le point d'infiltration (« perte ») principal, disparaissant sans trace dans le sous-sol déjà à quelque 4 ou 500 m à l'amont. Ainsi, il peut se produire que le lit du fleuve reste à sec pendant des mois entiers entre Möhringen et Tuttlingen (environ 5 km à l'aval de Möhringen). En 1921 et 1947 par exemple, la période d'assèchement a duré 9 mois. Il y a également un second point d'infiltration (« perte ») près de Fridingen, et ce n'est que lorsque les débits sont relativement importants que le fleuve arrive à faire écouler au moins une partie de ses eaux en surface à travers cette zone d'infiltration.

On a pu constater au moyen d'essais d'injection de couleurs que la plus grande partie des eaux souterraines se dirige vers la source de l'Aach près d'Engen, située quelque 12 km au sud, et à environ 170 m de plus en profondeur. C'est par ce dernier fleuve que les eaux prélevées au Danube sont amenées au lac de Constance, et de là au Rhin. On peut estimer qu'en moyenne 9 m³/s environ passent de cette façon dans le sous-sol chaque année, alors que le débit d'écoulement du Danube en cet endroit varie entre 1,6 m³/s (étiage) et 25 m³/s (crue). Le débit fourni par la source de l'Aach, en variant entre 1,5 et 25 m³/s, dépasse ainsi de loin ceux de toutes les autres sources en Allemagne.

Une détermination exacte de la ligne de partage des eaux entre le Rhin et le Danube ne peut donc se faire que pour les écoulements de surface. Or, en fait, une partie importante des précipitations provenant de la région de la Forêt-Noire-Danube ruisselle vers le Rhin, et, puisque la participation des deux systèmes fluviaux varie en cette bifurcation en fonction des débits, nous n'avons pas tenu compte du bassin versant de la Forêt-Noire-Danube dans le tableau I.

La carte hydrographique du Rhin (fig. 1) et le sommaire des bassins partiels figurant ci-dessous présentent une vue d'ensemble de la forme et de la constitution du bassin de réception du Rhin. Dans le sommaire, nous n'avons indiqué que ceux des tributaires du Rhin et de ses affluents ayant un bassin versant d'au moins 500 km², afin d'assurer une présentation claire.

2. — LE CLIMAT

Les influences déterminant le climat — tels que le degré de latitude, l'altitude au-dessus du niveau de la mer, le relief, la distance des océans — se font sentir de différentes façons dans le bassin du Rhin. L'influence prépondérante sur le climat, surtout en ce qui concerne le volume et la répartition des précipitations, est celle due au relief et la grande diversité des structures monta-

gneuses. Toutefois, la position par rapport aux mers influe également d'une façon très nette; le climat maritime, caractérisé surtout par son uniformité, qui règne dans la région de l'embouchure du Rhin et la basse plaine rhénane, cède peu à peu à un climat du type continental, à mesure que l'on s'éloigne de la mer. Ce dernier apporte déjà un échauffement appréciable et une

TABLEAU I

Distance à partir du pont du Rhin à Constance en km	Bassin de réception	Affluents		Rhin km²
		km²	km²	
166,7	Rhin à Bâle (limnimètre à l'embarcadère).....			35 929
	Elz, jusqu'au confluent du Dreisam.....	529		
	Dreisam.....	607		
	Elz, du Dreisam au Rhin.....	195		
251,0	Elz.....		1 331	
293,6	Kinzig.....		1 422	
	Ill, jusqu'au confluent de la Fecht.....	1 959		
	Fecht.....	540		
	Breusch.....	747		4 625
	Ill, de la Fecht au Rhin.....	1 379		
303,8	Ill.....			
	Moder, jusqu'au confluent de la Zorn.....	797		
	Zorn.....	616		1 710
	Moder, de la Zorn au Rhin.....	297		
331	Moder.....			
344,3	Murg.....		637	
400,6	Speyerbach.....		526	13 966
	Neckar, jusqu'au confluent de la Fils.....	3 298		
	Fils.....	706		
	Rems.....	580		
	Murr.....	507		
	Enz.....	2 223		
	Kocher.....	1 989		
	Jagst.....	1 832		
	Elsenz.....	541		
	Neckar, de la Fils au Rhin.....	2 290		
428,2	Neckar.....		7 956	
	Rhin, de Bâle à Mannheim.....			68 102
	Main Blanc.....	648		27 395
	Main Rouge.....	537		
	Rodach.....	1 012		
	Itz.....	1 039		
	Regnitz.....	7 551		
	Saale de Franconie.....	2 773		
	Tauber.....	1 863		
	Gersprenz.....	591		
	Kinzig.....	1 044		
	Nidda.....	1 895		
	Autres affluents du Main.....	8 442		
496,6	Main.....		2 991	
498,3	Rhin, de Mannheim à Mayence.....			98 488
	Rhin de Mayence (limnimètre).....			
	Nahe, jusqu'au confluent du Glan.....	1 757		4 043
	Glan.....	996		
	Nahe, du Glan au Rhin.....	1 290		
529,2	Nahe.....			
	Lahn, jusqu'à l'Ohm.....	673		
	Ohm.....	1 009		
	Dill.....	697		
	Lahn, de l'Ohm au Rhin.....	3 567		

Distance à partir du pont du Rhin à Constance en km	Bassin de réception	Affluents		Rhin km²
		km²	km²	
585,7	Lahn		5 946	138 231
	Moselle, jusqu'à la Meurthe	3 738		
	Meurthe	3 085		
	Seille	1 282		
	Sûre	4 316		
	Sarre	7 346		
	Moselle, de la Meurthe à Trèves	4 090	(23 857)	
	Kyll	843		
	Moselle, de Trèves à Coblenche	3 456		
592,2	Moselle		28 156	
	Rhin, de Mayence à Coblenche		1 598	
	Rhin à Coblenche, y compris la Moselle			
629,4	Ahr		930	
	Sieg, sans Agger	2 002		
	Agger	873		
659,3 702,6 735,6	Sieg		2 875	
	Wupper		920	
	Erfte		2 040	
	Ruhr, jusqu'à la Lenne	2 004		
	Lenne	1 322		
780,2 797,5 814,4 867,4	Ruhr, de la Lenne au Rhin	1 174		
	Ruhr		4 500	
	Emscher (nouvelle embouchure)		847	
	Lippe		4 891	
	Rhin, de Coblenche au Waal		4 789	
	Rhin, au début de son delta d'embouchure, près de Pannerden			160 023

abondance de jours ensoleillés au Moyen-Rhin, donnant à cette région des caractéristiques particulièrement favorables sous la forme d'une heureuse combinaison des différents éléments climatiques, permettant à cette région de produire un vin de premier ordre.

Pression atmosphérique et vents.

Les dépressions barométriques et les formations partielles souvent très étendues qui les accompagnent, provenant de l'océan Atlantique et pénétrant vers l'intérieur du continent, déterminent en premier lieu les conditions météorologiques de la région du Rhin. Par ailleurs, des dépressions provenant de la mer Méditerranée, qui traversent les Alpes et se dirigent vers le nord, peuvent parfois déterminer le temps qu'il fait dans le bassin du Rhin, apportant surtout des pluies abondantes au Haut-Rhin, et beaucoup de neige en hiver. Puisque les conditions

météorologiques sont différentes de part et d'autres des dépressions, on ne trouve que rarement un temps uniforme dans le bassin du Rhin. En hiver, les perturbations venant de l'Atlantique suivent pour la plupart les côtes maritimes, se dirigeant du sud-ouest vers le nord-est, alors qu'au printemps, les dépressions changent peu à peu leur direction de passage, passant d'abord de l'ouest à l'est et finalement, en été, de façon prépondérante du nord-ouest au sud-est. Il suit alors une période pendant laquelle la répartition des pressions est généralement peu prononcée, ce qui produit des débuts d'automne splendides (période désignée en Allemagne par « été des vieilles femmes »), suivie à son tour par une évolution en sens inverse. Par ailleurs, les zones de haute pression jouent également un rôle important en déterminant les conditions météorologiques du bassin du Rhin, surtout les zones de haute pression hivernales avec leur centre au-dessus de la Finlande et de la mer Blanche. Ces zones provoquent le mouvement, vers le nord-est

ou l'est, des masses froides d'air continental arctique apportant de basses températures extrêmes au bassin du Rhin, ce qui provoque souvent la formation de glace sur le fleuve.

La répartition générale des pressions atmosphériques

dans le bassin du Rhin est telle qu'il fait partie de la zone dans laquelle les vents d'ouest prédominent. La répartition des vents dans les différentes parties du bassin est résumée dans le tableau ci-dessous.

TABLEAU II
RÉPARTITION DES DIRECTIONS DU VENT, EN POURCENTAGE.

	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
Région du littoral. — Mer du Nord :								
Hiver.	5,2	8,9	12,1	12,2	8,9	24,4	14,9	10,0
Été.	10,7	7,9	6,8	6,5	5,7	16,6	19,0	23,5
Année entière.	8,3	9,1	10,2	10,2	7,5	19,6	15,4	15,9
Rhin-Inférieur et partie aval du Rhin-Moyen :								
Hiver.	6,4	9,8	8,6	6,3	9,4	30,5	14,4	7,8
Été.	9,0	8,2	5,2	4,5	6,5	24,7	18,6	17,6
Année entière.	8,0	10,3	7,1	5,8	8,7	26,6	15,5	12,2
Partie amont du Rhin-Moyen et Rhin-Supérieur :								
Hiver.	8,4	12,1	10,2	6,3	12,0	21,7	11,6	5,7
Été.	10,5	9,0	6,9	6,5	9,6	24,8	13,7	6,9
Année entière.	10,1	11,1	8,9	6,6	19,4	24,7	12,2	7,7
NOTA : La somme des chiffres ne donne pas 100, parce que les jours de calme ne sont pas représentés.								

Alors que les vents dans la plaine sont uniquement déterminés par la répartition des pressions atmosphériques et le passage des zones de haute ou de basse pression, les régions montagneuses sont par contre exposées à des perturbations dues à la déviation du vent par les massifs, et aux influences locales des vents de vallée et de montagne.

On enregistre les plus fortes vitesses dans la plaine, c'est-à-dire le long du Rhin-Inférieur, et les valeurs diminuent peu à peu en remontant le fleuve.

Précipitations.

La région du Rhin est une des plus riches en précipitations de tous les bassins de réception européens. Comme le laisse constater le précédent mémoire (par M.E. Walser), la valeur annuelle moyenne des précipitations pour le bassin du Rhin jusqu'à Bâle est de 1 420 mm; étant donné que, d'autre part, la valeur correspondante pour le bassin entre Bâle et Emmerich est de 750 mm, nous avons, pour les précipitations annuelles moyennes du bassin entier, jusqu'au début du delta d'embouchure, la valeur de 900 mm.

Les Vosges et la Forêt-Noire, deux massifs contigus à la frontière nord de la Suisse, suivent

de près les hautes montagnes de ce pays, recevant des précipitations annuelles atteignant 2 340 mm pour le premier, et environ 2 000 mm pour le second; les versants occidentaux de tous deux recueillent la plus grande part de ces précipitations. Par exemple, la région autour du lac d'Alfeld, situé à une altitude de 620 m sur le flanc ouest des Vosges, a une valeur moyenne annuelle de 2 340 mm; le chiffre correspondant pour la partie nord de la Forêt-Noire est de 2 000 mm, et celui pour la moitié sud, de 1 700 mm. L'effet de « barrière » des Vosges, qui se fait sentir jusqu'aux parties amont de la Moselle, fait que cette région reçoit également des précipitations annuelles considérables; par exemple, le col de Bussang, qui y est situé, reçoit des précipitations annuelles de 1 670 mm. Par contre, la basse-plaine du Rhin-Supérieur renfermée par les Vosges et la Forêt-Noire, et se trouvant sous le vent par rapport aux Vosges, ne reçoit que de très faibles précipitations; par exemple la valeur annuelle moyenne pour Colmar n'est plus que de 480 mm. Dans la région du Neckar, de la Forêt-Noire au bassin de la Souabe, les précipitations diminuent rapidement, et l'on trouve des valeurs annuelles moyennes inférieures à 700 mm dans plusieurs parties de cette région. Ce n'est qu'à Rauhe Alb et Odenwald que l'on retrouve de nouveau des précipitations

annuelles de plus de 1 000 mm. La région du Main est encore moins pluvieuse que le bassin souabe et, exception faite de la zone de la source du Main-Blanc, rivière venant du Fichtelberg où la moyenne annuelle dépasse 1 000 mm, les cours supérieur et moyen du Main traversent le bassin de Franconie peu pluvieux, où les moyennes annuelles tombent au-dessous de 600 mm, et même au-dessous de 500 mm au centre de cette région. Ce n'est que lorsqu'il atteint la région du Spessart, du Vogelsberg et du Haut-Rhön, qui se draine déjà en grande partie dans le Weser, que le Main atteint des valeurs plus importantes, pouvant dépasser 1 000 mm sur les sommets les plus élevés du Spessart et du Vogelsberg. La basse-plaine du Rhin-Supérieur et l'embouchure du Main sont suivis directement par le Rheingau, région peu pluvieuse dont la partie sèche rejoint, à l'ouest, les montagnes du Palatinat et le versant est du Hunsrück. Cette région est reliée par la vallée du Rhin aux zones sèches de la Moselle-Moyenne et Inférieure, et du Rhin-Moyen-Inférieur. Les précipitations ne dépassent nulle part 600 mm dans ces régions, et 500 mm dans la plus grande partie de la zone sèche du Rheingau. Dans la partie ouest du Hunsrück, ou plus exactement le Hochwald, on enregistre sur les points culminants des valeurs moyennes annuelles dépassant 1 000 mm.

De même que la Moselle, la Sarre a sa source dans la région pluvieuse des Vosges. Les sources des principaux affluents des rives gauches de la Moselle : la Sûre et la Kyll, sont situées dans des zones dont les valeurs moyennes annuelles sont de 800 - 900 mm. On ne peut compter le Taunus parmi les régions pluvieuses, étant donné que même les points culminants de ce massif montagneux ne reçoivent qu'à peine 900 mm. La région de Lahn n'est pas très pluvieuse non plus, et la zone le long de la rive gauche du Rhin-Inférieur, y compris l'Eifel, n'enregistre qu'au-dessous de 700 mm en moyenne pour l'année, et même moins de 550 mm dans la région de Euskirchen. Par contre, la région de la rive droite du Rhin-Inférieur est beaucoup plus pluvieuse, de même le Sauerland et le Westerwald, qui reçoivent tous plus de 800 mm, et pour la plus grande partie même plus de 1 000 mm annuellement. A la source et le long du cours supérieur de la Wupper, ainsi qu'aux sources de la Ruhr et de la Lenne, on trouve même des moyennes annuelles dépassant 1 300 mm. Par contre, au nord des deux dernières régions, les précipitations se répartissent très uniformément, restant autour de 700 mm.

Contrairement à ce qui se produit dans les Alpes, dans les régions à l'ouest, au nord-ouest, dans les Vosges, le Hunsrück, les Ardennes, l'Eifel, les bassins du Rhin-Inférieur et de la Sûre, la plupart des précipitations se produisent

en hiver. Ce phénomène est non seulement dû au fait que ces régions ne sont pas très loin de la mer, mais encore à l'effet de « barrière » des montagnes, dont l'influence est particulièrement prononcée pendant les vents d'ouest qui prédominent en hiver; par ailleurs, ces mêmes montagnes, en formant une « barrière contre le vent », contribuent à l'aspect « continental » de la répartition des pluies suivant les saisons dans les régions situées au sud-est et à l'est. Dans la Forêt-Noire, qui, en raison de sa situation est très importante du point de vue hydrographique, les précipitations sont presque uniformément réparties sur toute l'année.

Températures, brouillard.

Pour le Rhin-Inférieur, la différence entre la température moyenne du plus chaud mois d'été et celle du plus froid mois d'hiver est de l'ordre de 15° - 16°, augmentant vers le sud, et surtout dans les bassins des affluents situés dans des régions « continentales », c'est-à-dire ceux du Neckar et du Main, où elle atteint 18° - 19°. Dans les parties basses du bassin du Rhin en aval de Bâle, la température moyenne pour l'année est de 9° - 9,5°, suivant l'altitude des lieux. Dans la région montagneuse rhénano-westphalienne, dans le Hunsrück et le Taunus, l'Odenwald et les autres montagnes de moyenne altitude, la température moyenne annuelle varie entre 5° et 7°, suivant l'altitude. Dans les parties les plus élevées des Vosges et de la Forêt-Noire, elle est au-dessous de 4°.

Le brouillard est moins important du point de vue du régime et de l'économie fluviale que du point de vue de la navigation. Le brouillard peut être provoqué par des causes diverses : les rayonnements nocturnes de chaleur peuvent donner lieu au « brouillard de rayonnement », et d'autre part, lorsque des masses d'air froid rencontrent des masses d'air chaud, il se produit parfois le « brouillard de mélange ». Il existe en outre un troisième type de brouillard, appelé « brouillard d'advection », qui se produit lorsque des masses d'air relativement froides traversent des surfaces d'eau relativement chaudes; en ce faisant, ces masses se réchauffent et deviennent plus humides tout en étant entraînées vers le haut. L'épaisseur verticale des brouillards de rayonnement et d'advection est rarement très importante, et ils se dissipent le plus souvent très vite dès qu'ils sont exposés aux rayons solaires; par contre, les brouillards de mélange dans les zones limitrophes entre les masses d'air chaud et froid peuvent durer plusieurs jours. Le brouillard se produit le plus fréquemment en automne, et surtout pendant le mois de novembre.

3. — PENTES ET TRANSPORTS SOLIDES

La réponse de l'hydrographe à la question : « Comment doit-on appeler les tronçons partiels du Rhin, et comment définit-on leurs limites ? » ne sera pas la même que celles du géographe, du géologue, ou du navigateur. Et surtout, les termes bien connus « Rhin-Supérieur » et « Rhin-Moyen » ne correspondent pas toujours aux mêmes définitions suivant les cas (en sus de l'évolution que subit toute langue au cours des siècles).

En considérant le profil en long du Rhin en aval de Bâle (fig. 2), nous voyons clairement que le cycle classique de la pente de la ligne d'eau valable pour la plupart des fleuves, — soit : pente raide au cours supérieur, aplatissement d'allure parabolique au cours moyen, et pente

très douce, ou transition à l'horizontale, au cours inférieur —, ne se produit pas qu'une seule fois, mais se répète.

Lorsque nous parlons du cours inférieur du Rhin-Supérieur, dont la pente est raide, nous entendons la région large et plate que l'on appelle Rheingau. Plus loin, nous avons un deuxième tronçon à pente raide(*) du cours du Rhin-Moyen en aval de Bingen, qui s'adoucit ensuite progressivement vers le Rhin-Inférieur et se perd finalement ensuite dans la mer du Nord. A la lumière des définitions couramment employées aujourd'hui par les hydrologues et les ingénieurs hydrauliciens, nous obtenons donc le démembrement suivant :

TABLEAU III

Divisions principales	Divisions secondaires	Limites	Distance en km le long du fleuve à partir de Constance
I (Rhin alpin)	Rhin alpin	Sources du Rhin	—
	Lac de Constance	Embouchure au lac de Constance	50
		Sortie du lac à Stein	26
II (Rhin-Supérieur)	Haut-Rhin	Bâle	167
	Rhin-Supérieur	Mayence	498
	Rheingau	Bingen	528
		Cologne	688
III (Rhin-Inférieur)	Rhin-Moyen (parcours montagneux)	Pannerden	867
	Rhin-Inférieur		
	Zone d'embouchure, avec ramifications aux Pays-Bas	Mer du Nord	1 030

Le Rhin supérieur.

Même au cours des dernières décennies, le profil en long du Rhin-Supérieur s'est modifié assez considérablement. Dans l'œuvre, parue en 1889, intitulée : Le Rhin et ses affluents principaux (*) [12], on ne trouve pas encore de mention du « seuil d'Istein » au km 178. En effet,

(*) « Der Rheinstrom und seine wichtigsten Nebenflüsse. »

ce seuil ne s'accentua de façon marquée qu'à partir de l'année 1900, à la suite de l'érosion du lit du fleuve, et finit par gêner la navigation très sérieusement. On a d'abord remédié à cet état de choses en construisant un barrage déversant et un canal de contournement près de Kembs, et, plus tard au moyen d'un canal latéral, le « canal alsacien » ; toutefois, nous ne nous attarderons pas sur les détails de cet ouvrage ici.

(*) Sur la partie montagneuse.

quels on a pu établir les courbes de débit pour toute une série d'années, donnant à leur tour la relation entre la hauteur et le débit. Quant aux années pour lesquelles il n'existe aucune observation précise permettant d'établir des courbes de débit, on peut les déduire avec une précision suffisante de celles des années voisines. Au moyen de ces courbes, on a déterminé les débits journaliers des observations au limnimètre pour la période de 25 ans 1906-1930, les portant ensuite en abaque suivant leur ordre de grandeur. Si l'on retranche du schéma ainsi produit (fig. 3) $25 \times 20 = 500$ jours correspondant aux plus faibles débits, l'ordonnée de la courbe donne alors le débit correspondant à l'E.E. (pour 20 jours de cote < la cote de référence).

De cette manière, on a trouvé les débits équivalents suivants pour les stations limnimétriques principales du Rhin, pour une période de 20 jours de hauteur au-dessous de la cote de référence (tableau IV).

Des courbes de débit ont été établies pour les stations principales d'après les jaugeages de débit des années 1926/30, d'où on a ensuite déterminé les hauteurs équivalentes (E.E. 32) correspondant aux débits équivalents.

Suivant la décision adoptée par la Commission Centrale de la Navigation Rhénane, lors de la réunion de novembre 1932, les pays riverains doivent s'engager à créer ou à maintenir dans le chenal navigable les *profondeurs minima* suivantes, au-dessous de l'E.E. 32 :

En aval de Cologne.....	2,50 m
Entre Cologne et Saint Goar..	2,10 m
En amont de Saint Goar.....	1,70 m

TABLEAU IV
DÉBITS ÉQUIVALENTS

Station limnimétrique	Débit
Bâle	456 m ³ /s
Marlen	473 m ³ /s
Strasbourg	476 m ³ /s
Maxau	539 m ³ /s
Speyer (Spire)	556 m ³ /s
Worms	603 m ³ /s
Biebrich	708 m ³ /s
Kaub	738 m ³ /s
Andernach	835 m ³ /s
Cologne	861 m ³ /s
Düsseldorf	908 m ³ /s
Rees	983 m ³ /s
Lobith	984 m ³ /s

Les diverses hauteurs équivalentes aux stations limnimétriques principales (limnimètres de référence) sont résumées dans le tableau V :

Pour fixer l'E.E., on a systématiquement arrondi les cotes limnimétriques obtenues du calcul à ± 5 cm, en augmentant ou en diminuant, afin d'éviter une « précision » irréaliste. Toutefois, on peut considérer l'échelle de Kaub dans la partie montagneuse du cours comme n'ayant pas été modifiée.

Dans la région de Neuenburg (km 200, entre Kembs et Brisach), le lit du fleuve a été érodé d'environ 4,00 m au cours du dernier siècle, et d'environ 6,5 m depuis les travaux de correction

TABLEAU V
ÉTIAGES ÉQUIVALENTS

Station	Hauteur < cote de référence pendant 47 jours			Hauteur < cote de référence pendant 20 jours		Hausse + Baisse — de 1908 à 1952
	1908	1923	1932	1932	1952	
Bâle	42	4	— 11	— 37	eaux retenues	—
Brisach	265	222	203	180	75	— 167
Strasbourg	179	183	171	148	140	— 16
Maxau	313	335	343	316	315	+ 29
Speyer (Spire)	253	248	247	215	210	— 11
Worms	186	152	148	114	95	— 57
Mayence	255	227	218	183	170	— 50
Kaub	143	144	140	108	105	— 6
Andernach	200	193	175	129	130	— 24
Cologne	150	127	110	61	55	— 46
Düsseldorf	329	301	270	220	185	— 94
Ruhrort	491	431	389	336	250	— 188
Emmerich	303	292	271	218	170	— 80

du fleuve. La pente moyenne du Rhin-Supérieur, ici d'environ 0,82 ‰, diminue constamment vers l'aval, jusqu'à la valeur minimum de 0,4 ‰, qu'elle atteint sur le tronçon Oppenheim-Mayence. Comme le montre le tableau V, le Rhin s'est également approfondi considérablement à Brisach; toutefois, l'érosion à Worms et Mayence est légèrement moins marquée, tandis que dans la région de Maxau, par contre, le terme « exhaussement du lit » semblerait même plus approprié. Les travaux d'aménagement effectués sur le Rhin-Supérieur pendant le dernier siècle ont largement utilisé la force vivante du fleuve et l'ont systématiquement dirigé dans des voies bien déterminées.

Le Rheingau

Le Rheingau évoque l'image d'un fleuve très large parsemé de grandes îles. La pente de la ligne d'eau entre Mayence et Bingen est de 0,11 ‰ en période de basses eaux. Etant donné la grande largeur de son lit et sa faible pente, le Rhin ne parvient à transporter qu'une faible partie des apports de matériaux solides provenant du Rhin-Supérieur et du Main, qui consistent surtout en sable, jusqu'à la partie rocheuse de son cours. La majorité de ces matériaux se dépose dans le Rheingau-même et aux endroits où le fleuve est très large, comme par exemple dans la « baie » de Mittelheim, créant des îles ou agrandissant celles qui existent déjà. Par ailleurs, les dépôts de sable mettent très souvent en cause la profondeur navigable, en nécessitant des dragages importants.

L'abaissement de la ligne d'eau près de Mayence n'a réduit la pente moyenne dans le Rheingau que très faiblement (de 0,12 ‰ à 0,10 ‰). On peut s'attendre à ce que cette évolution continue, et donc que la tendance du Rhin à retenir les matériaux solides dans le Rheingau devienne plus marquée.

Le Rhin moyen.

Le Rhin-Moyen commence à l'endroit où le fleuve pénètre dans le massif du « Rheinisches Schiefergebirge » (*), qu'il quitte plus tard entre Bonn et Cologne. Etant donné que la limite de la zone anciennement administrée par la « Preussische Rheinstrombauverwaltung » (Administration prussienne pour l'aménagement du Rhin) était à Biebrich, et que d'autre part le confluent avec le Main (le deuxième affluent par ordre d'importance après la Moselle) est considéré comme un point limite naturel, on a souvent considéré le Rheingau comme faisant partie du

Rhin-Moyen. Toutefois, du point de vue hydrographique, le Rheingau ne peut vraiment pas être considéré comme autre chose que la région « d'embouchure » du Rhin-Supérieur, et ce n'est qu'à Bingen que le caractère du fleuve change fondamentalement, à l'entrée de la région montagneuse.

Le début du Rhin-Moyen est donc à fixer en définitive à Bingen. Par contre, il est plus difficile de déterminer la limite séparant le Rhin-Moyen du Rhin-Inférieur avec autant de précision. A Bonn, les contreforts du « Rheinisches Schiefergebirge » atteignent le voisinage immédiat des deux rives du Rhin, alors qu'ils sont entièrement hors de vue à Cologne. Le fleuve ne change pas beaucoup de caractère sur le parcours, tant en ce qui concerne la structure de son lit que sa pente. Le choix de Cologne comme limite séparant le Rhin-Moyen du Rhin-Inférieur, est déterminé plutôt par le fait que c'est là que se situe le terminus de la navigation maritime sur le Rhin, que par des considérations d'ordre hydrographique.

Lorsque les ingénieurs hydrauliciens (hydraulique fluviale) ou les cercles de la navigation, parlent du cours montagneux, ils n'entendent que le parcours entre Bingen et Coblenze, où les monts, souvent couronnés de châteaux, se situent si près du fleuve qu'il a été nécessaire d'effectuer des déblayages artificiels à plusieurs endroits avant de pouvoir construire les lignes de chemin de fer et des routes riveraines. Le lit du fleuve est jalonné de barres rocheuses, de creux profonds, de rapides, de parcours tranquilles où l'écoulement est lent, de rétrécissements de section, d'élargissements en forme de bassin, de coudes serrés et de divisions du courant, tous se suivant en alternance rapide, de sorte qu'il y a des ruptures de pente très brusques. On a relevé sur de courtes distances les pentes maxima indiquées ci-dessous, pour une cote limnimétrique de 1,50 m à Bingen :

Au « Trou de Bingen » (Binger loch) :

	8,2 ‰	sur	17 m
	4,2 ‰	sur	40 m
et	3,1 ‰	sur	110 m

Dans les rapides..... 1,7 ‰ sur 100 m

Dans le chenal navigable n° 2 :

	1,1 ‰	sur	1 000 m
		de	longueur.

La pente minimum de 0,01 ‰ se situe entre Kammereck et la Lorelei, où le Rhin suit la direction des couches de la montagne, s'étant creusé un chenal de plus de 20 m de profondeur qui constitue presque une fissure. Sur de plus grandes longueurs, la pente moyenne de l'E.E.

(*) Massif schisteux rhénan.

est de 0,56 ‰ entre Bingen et Trechtlingshausen, diminuant ensuite et devenant finalement 0,10 ‰ entre Boppard et Coblenze. Elle raidit ensuite de nouveau en aval du confluent avec la Moselle, atteignant 0,25 ‰ entre Coblenze et Andernach, d'où, sauf sur quelques courts parcours, elle varie entre 0,20 et 0,23 ‰ jusqu'à Cologne.

Le débit solide du Rhin-Moyen reste entre des limites modérées. D'après l'œuvre intitulée « Der Rheinstrom und seine wichtigsten Nebenflüsse » (Le Rhin et ses affluents principaux) [12] : « l'allure du profil en long justifie la conclusion que, malgré le fait que le lit du Rhin en aval de son confluent avec la Moselle est entièrement constitué de gravier, la mobilité de ce lit reste toutefois restreinte, établissant par endroits et sur certains parcours une opposition considérable à l'évolution d'un profil en long régulier. Autrement dit, la forme du lit correspond aux multiples fissures, tout comme dans le Rheingau; tout comme pour les transports de sable dans ce dernier, les transports des solides du Rhin-Moyen paraissent s'effectuer sur un fond solide. Les apports solides actuels des affluents, du moins entre la Moselle et le Sieg, ne semblent guère contribuer aux ruptures de pente du Rhin ».

Ces remarques sont encore justifiées aujourd'hui.

Le Rhin inférieur.

A partir de Cologne, le Rhin devient un fleuve majestueux de basse-plaine se dirigeant avec plusieurs grandes boucles vers son delta d'em-

bouchure. Les anciennes cartes de la région nous montrent clairement comment il changeait de lit sans cesse. Les essais de correction des années 1764 à 1794, et ceux du début du XIX^e siècle, qui furent tous entrepris avec des moyens insuffisants, n'ont eu que des succès médiocres, et ce n'est qu'autour du milieu du XIX^e siècle que l'on retrouve des travaux de construction de plus grande envergure pour la régularisation du cours du Rhin, travaux qui se terminèrent en grande partie vers la fin du siècle, nous laissant le lit du Rhin tel que nous le connaissons aujourd'hui. L'évolution qui se poursuit dans le Rhin-Inférieur est donc analogue à celle de la basse-plaine du Rhin-Supérieur, et les abaissements du lit et du plan d'eau du Rhin-Inférieur [5] qui se poursuivent encore actuellement provoquent bien des soucis à tous les intéressés (Cf. tableau de synthèse des Hauteurs Equivalentes). L'abaissement des nappes phréatiques dans les zones au voisinage du fleuve touche non seulement l'agriculture, mais fait encore diminuer le débit des très nombreuses sources d'eau dans ces zones. Plusieurs entreprises industrielles qui puisent l'eau nécessaire à leur exploitation directement au fleuve, risquent de voir leurs conduites d'aménées mises entièrement à sec. Par ailleurs, les nombreux ports sont contraints d'approfondir leurs bassins et de renforcer et soutenir leurs quais. L'examen détaillé de tous ces problèmes nous mènerait beaucoup trop loin, mais remarquons néanmoins que la pente de la ligne d'eau correspondant à l'E.E. 52 est en moyenne de 0,18 ‰ en aval de Cologne et jusqu'à Düsseldorf, d'où elle diminue, devenant entre Rees et Emmerich 0,064 ‰.

4. — DÉBITS

Grâce au fait que ses sources se situent dans des régions alpines, ainsi qu'aux très diverses caractéristiques des bassins versants de ses affluents, le Rhin possède des débits très uniformément répartis par rapport à d'autres fleuves.

Bien que le bassin de réception du Rhin jusqu'à Bâle ne comprenne pas encore le quart du bassin versant total du Rhin, le débit annuel moyen s'écoulant à Bâle atteint déjà 48 % du débit total du fleuve. Le débit spécifique, c'est-à-dire le débit par unité de surface du bassin de réception à Bâle, était, pour les années 1936 à 1955, de 29 l/s/km², soit plus du double des 13,7 l/s/km² correspondant à Rees (ou Emmerich).

Le tableau VI présente une vue d'ensemble des caractéristiques du régime d'écoulement du Rhin. En règle générale, le rapport

crue/étiage est d'autant plus élevé que le bassin de réception est plus petit. Dans le cas du Rhin, cependant, on observe exactement la tendance inverse vers l'aval à partir de Worms : à mesure que le bassin de réception augmente, d'autant plus l'influence compensatrice des lacs alpins se trouve-t-elle en régression.

La répartition des débits suivant les saisons, ainsi que les valeurs extrêmes instantanées pouvant se produire, sont au moins aussi importantes que le volume d'eau absolu débité par le fleuve vers la mer au cours d'une année. Si la plus grande partie du débit annuel total passe pendant seulement quelques jours avec une violence telle que toutes les embarcations sur le fleuve doivent se mettre en lieu sûr, alors que les débits restent faibles pendant le reste de l'année,

TABLEAU VI. — DÉBITS DU RHIN ET DE SES AFFLUENTS PRINCIPAUX

Limnimètre, Rhin ou affluent	Bassin de réception km ²	NNQ depuis 1901		Années 1936/55					HHQ(**) depuis 1901	
		m ³ /s	Année	MNQ m ³ /s	MQ m ³ /s	Mq l/s/km ²	MHQ m ³ /s	MNQ MHQ	m ³ /s	Année
St. Margrethen ..	6 112	40	1947	57,8	224	36,7	1 450	1:25	2 600	1954
Nohl	11 893	104	1909	147	366	30,8	721	1:4,9	1 070	1926
Aare	17 625	141	1921	253	604	34,3	1 590	1:16	2 250	1910
Bâle	35 925	272	1909	453	1 040	29,0	2 840	1:6,3	4 300	1910
Neckar	12 966	13	1949	32,3	160	12,3	1 370	1:42	2 500	1947
Worms	68 936	408	1947	647	1 400	20,3	3 280	1:5,1	5 600	1955
Main	27 395	32	1947	58,5	188	6,9	1 050	1:18	2 210	1920
Nahe	4 043	1,6	1921	3,75	29,3	7,25	343	1:91	820	1926
Kaub	103 729	482	1947	772	1 580	15,20	4 010	1:5,2	6 500	1920
Lahn	5 946	7	1921	9,1	45,2	7,6	362	1:40	1 150	1909
Moselle	28 156	26	1921	62	307	10,9	2 050	1:33	4 260	1926
Andernach	139 795	560	1947	838	1 950	13,9	6 110	1:7,3	11 100	1926
Ruhr (**)	4 500	0	1947	6,9	60,9	13,5	685	—(**)	1 962	1942
Lippe	4 891	6,5	1929	10,3	50,5	10,3	306	1:30	858	1946
Rees	159 683	590	1947	968	2 190	13,7	6 490	1:6,7	12 200	1926

(*) Voir le tableau des symboles en tête de l'article.

(**) L'écoulement de la Ruhr subit l'influence de la présence de barrages artificiels et des prélèvements d'eau (emploi industriel, adduction). Une grande partie des eaux ainsi utilisées est restituée dans la rivière Emscher.

cela ne sert pas à grand'chose à la navigation. Une telle irrégularité des débits entraîne d'ailleurs également des désavantages pour tous les lieux habités dans la vallée, et de même pour l'agriculture. Les inondations peuvent provoquer des dégâts catastrophiques, alors qu'on se trouve, en temps d'étiage, devant un manque d'eau d'alimentation pour l'industrie et les besoins domestiques. De plus, lorsqu'il y a un tel manque d'eau, le fleuve n'arrive plus à décomposer suffisamment vite et en volume adéquat les eaux d'égouts et impuretés desquelles il se trouve chargé en route, de sorte que le taux de mortalité des poissons augmente considérablement, et il y a un grave risque d'épidémie. On voit donc qu'une répartition aussi uniforme que possible des débits sert aux intérêts de tous les usagers du fleuve.

Les avantages de l'effet combiné des fleuves alpins et des affluents provenant du Mittelgebirge se voient le mieux si l'on compare les débits moyens des différents mois. La fig. 4 indique, en fonction des mois, les débits d'écoulement moyens des années 1936/55 relevés sur quelques-uns des limnimètres principaux. Schmitter (près de l'embouchure du Rhin alpin dans le lac de Constance) et Nohl (à 50 km en aval du pont sur

le Rhin à Constance) sont des cas particuliers, les MQ (débits moyens) correspondant à la période 1919/55 pour le premier, et à 1909/55 pour le second.

Ainsi que M.E. Walser le précise en détail dans le mémoire précédent, les précipitations estivales sont plus importantes que celles d'hiver dans les régions alpines, celles d'hiver étant d'ailleurs « emmagasinées » en grande partie dans les glaciers et les champs de neige jusqu'en été, jusqu'à ce que la fonte leur permette de s'écouler. Or, nous avons le cas contraire pour les débits d'écoulement du Mittelgebirge et de la plaine : très faibles pendant l'été parce que les pluies estivales dans cette région sont beaucoup moins abondantes, et qu'en plus, ces eaux sont absorbées par la végétation en plus grande quantité, alors qu'en hiver, pratiquement, la totalité des eaux de précipitations ruisselle sur la surface du sol gelé.

Environ la moitié du débit global s'écoulant dans le Rhin vers la mer provient des régions alpines (moyenne annuelle), et alors que cette fraction n'atteint que 27 % en hiver, elle augmente par contre de façon appréciable en été pour devenir presque 70 % au mois de juillet. Les apports au Rhin, provenant des régions

FIG. 4
Débit
du Rhin.

DÉBIT MOYEN POUR LA PÉRIODE 1936/1955 (en 10 m³/s)

Station	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.
Schmitter (*)	14	9	8	7	10	19	38	52	43	31	25	18
Nohl (**)	30	25	23	21	22	29	43	61	64	53	44	35
Rheinfelden (***)	86	77	75	77	86	100	114	148	150	125	105	86
Worms	128	126	129	136	140	146	140	173	177	146	128	115
Kaub	145	150	159	173	175	170	149	179	189	153	134	126
Andernach	186	204	228	246	233	214	172	198	201	169	149	148
Rees	208	238	264	290	266	246	191	210	216	184	162	162

(*) La station de Schmitter est située à environ 11 km en amont de l'embouchure du Rhin dans le lac de Constance, période 1919/55,

(**) La station de Nohl est située à environ 25 km en aval de l'exutoire du Lac de Constance, période 1909/55.

(***) La station de Rheinfelden est située à environ 18 km en amont de Bâle, période 1936/55.

alpines, sont donc d'une importance primordiale pour le Rhin-Inférieur, et en particulier pour la navigation.

On a souvent posé la question suivante : « Doit-on s'attendre à ce que la répartition des débits du Rhin devienne de plus en plus irrégulière au cours des futures décennies, c'est-à-dire que les périodes d'étiage deviennent plus longues et les pointes de crue plus prononcées? ». En effet, il est incontestable que les glaciers alpins se trouvent en régression depuis un siècle, que de vastes étendues agricoles ont été drainées, et que l'on a construit de nombreuses rues et villes, toutes équipées d'égouts, pendant cette période. Or, tous ces facteurs jouent certainement dans le même sens; les eaux de précipitation s'écoulent plus rapidement, aggravant ainsi le danger des crues, la réserve emmagasinée dans les glaciers diminue, et le sol a moins de temps et d'occasion de recevoir les eaux de précipitation en tant qu'eaux souterraines afin de pouvoir alimenter des sources en temps de sécheresse ou fournir des apports aux rivières à partir de la nappé phréatique.

Les études réalisées jusqu'à ce jour d'une part par l'Institut Fédéral Hydrologique (Bundesanstalt für Gewässerkunde), et d'autre part par K. Schnell [13], ont montré que la supposition suivant laquelle le Rhin aurait tendance à permettre l'écoulement de crues de plus en plus importantes et fréquentes, au cours des décen-

nies, et laisserait s'abaisser le niveau de l'étiage de plus en plus bas tout en prolongeant sa durée, ne se manifeste ni se vérifie en réalité à l'échelle attendue. Les modifications du régime des débits d'écoulement provoquées par les influences dont nous parlions plus haut se trouvent entièrement reléguées à l'arrière-plan par les variations de longue durée dues aux conditions météorologiques.

Cette constatation ne nous libère toutefois d'aucune façon de la tâche nécessaire, soit de prendre toutes les mesures imaginables pouvant servir à rendre la répartition des débits du Rhin encore plus uniforme. En effet, d'une part, des précipitations exceptionnelles peuvent provoquer des crues exceptionnelles et dévastatrices, alors que, d'autre part, des sécheresses de longue durée, telles que celles des années 1921, 1947, et 1949, peuvent s'accompagner d'une disette faisant de l'eau une matière très précieuse pour les hommes, l'industrie et la navigation. Il ne faut donc épargner aucun effort pour empêcher autant que possible que les eaux fournies en temps de précipitations abondantes ne s'écoulent par ruissellement, et de prendre des mesures convenables pour emmagasiner le plus grand volume d'eau possible. Ceci fait tout de suite penser aux barrages qui, en fermant des vallées, permettent de régler les eaux fournies par leurs bassins versants pratiquement à volonté, c'est-à-dire d'écarter les crues et de fournir des compléments d'eau en

TABLEAU VII. — BARRAGES

Nom (cours d'eau)	Capacité m ³ × 10 ⁶	Surface maximum en ha	Hauteur de retenue maximum en m	Année de construction
Schluchsee (Schwarze-Schlucht-Wutach)	108	513	35	1929-32
Schwarzenbach (Schwb. Murg)	14,3	68	42	1922-26
Wahnbach (Wahnbach-Sieg)	43,2	225	50,5	en construction
Agger (Agger-Sieg)	19,3	151	40	1927-29
Genkelbach (Genkel-Agger-Sieg)	9,75	70	39	1950-53
Kerpe (Kerpe-Wupper)	15,5	157	27,5	1911-12
Bever (Bever-Wupper)	23,7	193	32	1935-38
Neye (Neye-Wupper)	6	68	24,2	1905-06
Bigge (Bigge-Lenne-Ruhr)	140	700	48,4	en construction
Möhne (Möhne-Ruhr)	135	1 037	33,7	1908-13
Sorpe (Sorpe-Röhr-Ruhr)	71	300	56,5	1926-35
Henne (Henne-Ruhr)	39	210	54	1951-55
Verse (Verse-Lenne-Ruhr)	33	170	49	1938-51
Lister (Bigge-Lenne-Ruhr)	22	168	32,9	1909-12
Ennepe (Ennepe-Volme-Ruhr)	12,6	103	33,3	1902-04
Baldeneysee (Ruhr)	9	240	6,4	1926-27
Retenue de Haltern (Stever-Lippe)	6	220	3,9	1927-30
	706,55			

période de sécheresse. En outre, ces barrages fournissent pour la plupart une source précieuse d'énergie. La partie allemande du bassin du Rhin contient actuellement les barrages d'importance majeure mentionnés dans le tableau VII, et contenant un volume utile d'au moins 5 millions de mètres cubes par barrage.

La capacité totale de ces retenues serait donc juste suffisante pour relever le plan d'eau du lac de Constance de 1,30 m. Il ne faut toutefois pas perdre de vue que, de loin, la plupart de ces barrages sont situés dans le bassin de réception des affluents *inférieurs* (aval) du Rhin. Il s'ensuit que la plupart d'entre eux ne peuvent avoir aucune influence sur les débits des parcours particulièrement critiques pour la navigation (Bingen-Saint Goar-Ruhrort). La vraie valeur de ces retenues réside en la protection qu'elles offrent aux riverains des affluents sur lesquels elles se trouvent et en la production d'énergie.

Les mesures prises pour alimenter les eaux souterraines sont probablement plus importantes que ces barrages, en ce qui concerne la régula-

risation du Rhin même. Elles comprennent un large programme d'afforestation, et prévoient des tranchées à flanc de coteau pour retenir l'eau des très nombreux ruisseaux à partir de leurs sources, laissant ensuite cette eau s'infiltrer dans le sous-sol. Une autre mesure complémentaire est la limitation sévère du volume d'eau puisé à la nappe par les entreprises d'alimentation en eau domestique et industrielle, en contraignant ces usagers à pourvoir à leurs besoins en prélevant sur le cours d'eau le plus proche aussi longtemps qu'il aurait un débit abondant et qu'autrement l'eau prélevée s'écoulerait inutilement vers la mer. Il importe peu, du point de vue de l'économie hydrologique, que cette eau soit prélevée directement à la rivière en question ou qu'elle passe d'abord par une surface filtrante; ce qui est vraiment important est la certitude que chaque centimètre gagné en hauteur sur le niveau de la nappe par ces mesures signifie la conservation d'un volume d'eau considérable pour celle-ci, qui, en temps de sécheresse, enrichit de nouveau le fleuve sous forme d'eau de percolation.

5. — CRUES

Le danger des crues est bien plus réel pour le Rhin-Moyen et le Rhin-Inférieur que pour le Rhin-Supérieur, étant donné que ce dernier se trouve soumis surtout à l'influence des régions alpines. Les crues d'été provenant de ces régions sont d'ores et déjà très atténuées par les nombreux lacs alpins. C'est ainsi que le lac de Constance retient dans une telle mesure les masses d'eau qui lui sont fournies en période de grosse crue (HHW) par le Rhin alpin (avec, en plus, les eaux du Bregenzer Ach, l'Argen et le Schussen, et tous les autres petits affluents du lac), que l'apport à ce lac du Rhin alpin à lui seul repré-

sente plus du double du débit sortant du lac. Par ailleurs, la manière dont le lac de Bienne « décharge » l'Aar supérieur en refoulant les eaux de crue dans les lacs de Neuchâtel et de Morat est extrêmement avantageuse.

Etant donné en outre que le lit du Rhin-Supérieur s'est approfondi de façon appréciable sur de longs parcours, les eaux de crue ne quittent que rarement le vrai lit du fleuve, qui n'est par conséquent jamais mis gravement en danger en période de crue : par contre, il n'en est guère de même pour les affluents provenant de la Forêt-Noire, qui peuvent souvent grossir violem-

TABEAU VIII. — POINTES DE CRUE A COLOGNE.

Cote (Cologne)	Fréquence et durée (jours)	Nombre de pointes de 1814 à 1955. — Dépassement (nombres de jours)											
		Hiver						Eté					
		Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.
7,00	Pointe	8	11	17	14	14	4	—	—	—	—	—	1
	Durée	51	61	84	66	64	13	—	—	—	—	—	2
8,00	Pointe	6	3	10	6	2	—	—	—	—	—	—	—
	Durée	22	18	31	14	12	2	—	—	—	—	—	—

FIG. 5
Crues
maxima
annuelles
du Rhin
à Cologne

ment et en très peu de temps. Toutefois, nous irions trop loin si nous voulions considérer les régimes de crue dans les bassins de tous les fleuves secondaires, et nous n'examinerons ce problème qu'en ce qui concerne le Rhin lui-même.

Déjà à partir de l'embouchure du Neckar, mais encore plus après celle du Main, ce sont les affluents provenant du Mittelgebirge qui déterminent de manière décisive la forme sous laquelle s'écoulent les débits de crue. C'est ainsi qu'en aval du confluent avec la Moselle, on ne constate en général plus aucune influence des eaux provenant du parcours méridional du Rhin-Supérieur en temps de crue. Il s'ensuit que les pointes maxima de crue du Rhin-Moyen et du Rhin-Inférieur se produisent pendant les mois d'hiver. Pendant les 142 années de la période de 1814 à 1955, pour lesquelles on dispose des observations limnimétriques, on constate que la cote à Cologne a dépassé 7,00 m soixante-neuf fois, réparties sur 359 jours, et 8,00 m vingt-sept fois, réparties sur 99 jours. Ces dépassements se répartissent en fonction des différents mois de la manière indiquée par le tableau VIII.

Nous n'avons compté des pointes successives individuellement que dans les cas où la cote entre deux de ces pointes est retombée au-dessous de 6,00 m mesurés au limnimètre de Cologne.

En ce qui concerne la répartition des crues en fonction des saisons, on peut considérer le tableau VIII comme caractéristique pour les conditions aux stations en aval de l'embouchure de la Moselle. Presque toutes les crues maxima se concentrent dans la période novembre-mars, atteignant la valeur maximum pendant le mois de janvier.

Il suffit de considérer d'un peu plus près les causes de ces intumescences importantes pour trouver une explication simple de ce phénomène. Une subite hausse de température fait fondre la couche de neige hivernale qui retenait les précipitations des semaines précédentes, libérant ainsi des masses considérables d'eau, et l'air maritime chaud et humide arrivant dans la région provoque des pluies continuelles sur de vastes régions. Puisque le sous-sol est saturé d'eau, il ne peut absorber aucune partie des masses d'eau soudainement libérées, de sorte qu'elles s'écoulent directement dans les ruisseaux et les rivières.

Trois crues exceptionnelles se sont produites dans les années 1901 à 1955, dépassant toutes la cote de 9 m à Cologne. A notre siècle, après un intervalle de presque quarante années, la première grosse crue du Rhin s'est produite en 1919/20 (voir fig. 5), s'écoulant en deux « ondes », à environ trois semaines l'une de l'autre. Alors que la première « onde » était plus importante

sur le Rhin-Supérieur, elle a été dépassée par la seconde à partir de Mayence, cette dernière ayant été alimentée d'une façon plus vigoureuse, et soutenue par les divers affluents. Les deux crues ont dépassé la cote de 8 m à Cologne pendant 6 jours, la première atteignant la cote maximum de 8,70 m, et la seconde 9,58 m. A titre comparatif, signalons que la « Uferpromenade » à Cologne est inondée lorsque la cote atteint 8 m, et que l'embarcadere du port de Rheinau est envahi par les eaux dès que la cote atteint 8,70 m. La représentation graphique de la figure 6 ne montre que la plus haute des deux ondes de crue dans chaque cas.

Après une crue légèrement moins prononcée en novembre 1924, qui atteignit à Cologne la cote de 8,80 m, on a enregistré fin 1925, début 1926 la plus importante crue de toutes. On voit d'après la figure 6, sur laquelle sont indiquées les cotes maxima atteintes aux diverses échelles limnimétriques, que la crue du Nouvel An de 1925/26 a effectivement dépassé la cote de 1919/20, bien que seulement à l'aval de Coblenze; en amont de Mayence, par contre, la cote atteinte était à peine plus élevée que celle correspondant à une crue moyenne. Or, la crue de 1925/26 fut provoquée par des conditions météorologiques exceptionnelles et très défavorables, pendant lesquelles, contrairement à toutes les périodes de crue normales, la partie sud du bassin du Rhin a été atteinte par le changement de temps et par les précipitations très abondantes 2 ou trois jours avant la région du Rhin-Inférieur. Pendant les grosses crues des années 1920 et 1948, le temps doux provoquant la fonte et ses précipitations s'est toujours avancé de l'ouest et du nord-ouest vers le sud, de sorte que les ondes de crue des affluents (de la Moselle et de la Ruhr en particulier), s'étaient déjà écoulées en grande partie avant que l'onde principale du Rhin n'ait atteint l'embouchure du fleuve. Par contre, en 1925/26, les maxima des crues s'écoulant des affluents ont pratiquement tous atteint l'embouchure au même moment que celui du Rhin même.

La cote atteinte par la crue de janvier 1948 est toujours restée au-dessous de celles des crues exceptionnelles de 1920 et 1925/26. Toutefois, elle a atteint 941 cm à Cologne (par rapport à 969 cm au 1^{er} janvier 1926), ce qui est quand même une valeur non négligeable. Cette forte remontée du niveau à Cologne est due à l'effet de refoulement produit par les débris des divers ponts situés en aval du limnimètre d'alors, qui ont été détruits pendant la guerre (pont routier reliant Cologne à Deutz, pont des Hohenzollern, pont de Mülheim.)

La crue de janvier 1920 a provoqué des ruptures de digues près d'Ilverich et Grimmlinghausen dans la région de Düsseldorf, et une

FIG. 6. — Dépassement de la crue maximum 1936/1955 depuis 1901

digue primaire a débordé au droit de Wesel. En outre, les eaux de toutes les crues ont provoqué des dégâts considérables aux maisons et aux installations d'alimentation. Il est intéressant de noter à cet égard que les pertes de mobilier, stocks et matériel en entrepôt dans les ports étaient plus importantes en 1919/20 que pendant les crues récentes, étant donné qu'il a été possible par la suite de mettre la plupart de ces biens en lieu sûr, grâce à des alertes données en temps utile et aux progrès réalisés dans la prévision des crues. Le lecteur trouvera des précisions plus détaillées sur le mode de fonctionnement actuel du « Service d'annonce des crues » dans le chapitre « Le Service Hydrologique » à la fin du présent article. La crue de 1925/26 a atteint 28 000 maisons, 30 000 caves et 2 500 ateliers dans la province Rhénane, rendant nécessaire l'évacuation de plus de 13 500 maisons d'habitation. En outre, 74 000 hectares de sol agricole ont été inondés, provoquant l'ensablement des cultures et, à d'autres endroits, les eaux ont emporté la couche productive du sol et les semences, ce qui représente des dégâts considérables. La quasi-totalité des dégâts provoqués par la crue de 1925/26 se trouvait dans la partie prussienne du bassin du Rhin, et on a estimé qu'ils représentaient une perte de l'ordre de 100 millions de reichmarks. Les ouvrages rivaux et d'aménagement du Rhin et de ses affluents n'ont que peu souffert, grâce à

leur construction robuste et logique, et n'ont représenté que 0,4 % de la perte totale. Bien que l'on ne dispose d'aucune synthèse assez complète des dégâts provoqués par les crues des autres années, on peut toutefois dire qu'ils furent beaucoup moins graves que ceux de l'hiver 1925/26. La crue de janvier 1948 a néanmoins été la cause d'un souci particulier pour les administrations de la navigation fluviale, car elle menaçait les pieux supportant les nombreux ponts de fortune remplaçant les ponts détruits pendant la guerre; par ailleurs, les eaux gonflées du fleuve risquaient également d'emporter les très nombreuses épaves qui s'y trouvaient encore à l'époque. Les crues des années 1953 et 1955 ont surtout atteint la région du Rhin-Supérieur. Celle de 1953 a montré que des crues dangereuses peuvent même se produire en été sur le Rhin-Supérieur, alors que toutes les crues d'importance majeure en aval du confluent avec le Main ont lieu en hiver. Grâce au système perfectionné d'alertes de crue, on a pu empêcher des dégâts considérables pendant la crue de 1953 et de même, celle de 1955 a pu être maintenue dans des limites modérées, bien que les digues de protection sur le parcours Maxau-Mayence aient été fortement menacées, étant donné que le plan d'eau a, par endroits, atteint un niveau d'à peine 20 cm au-dessous de leur crête. Par ailleurs, quelques digues de refoulement ont été inondées à certains endroits. Après

chaque crue catastrophique, on se demande de nouveau par quels moyens, justifiables du point de vue économique, on pourrait empêcher ces dégâts ou du moins les limiter. Une position très détaillée a été prise vis-à-vis de cette question dans le rapport « Gutachten der Preussischen Landesanstalt für Gewässerkunde über die Ursachen und den Verlauf des Hochwassers im Rheingebiet im Dezember 1925 und Januar 1926 und über die Massnahmen zur Verhütung von Wasserschäden » (Rapport d'expertise de l'Institut Régional de Prusse d'Hydrologie sur les causes et l'évolution de la crue du Rhin de décembre 1925 et janvier 1926, et sur les mesures qui seraient à prendre pour prévenir les dégâts provoqués par les eaux de crue) paru en 1929. Parmi les notions fondamentales les plus importantes, qui confirment d'ailleurs notre propre expérience, nous trouvons ce qui suit :

« Les divers domaines de la vie économique évoluent de plus en plus dans les basses régions des rivières, en sorte que, pour des crues égales, les dégâts provoqués par les eaux de crue ont augmenté et augmenteront encore davantage. Par conséquent, l'importance des méthodes de prévention permettant de lutter contre les dégâts provoqués par les crues augmente également de plus en plus.

« La construction des barrages de retenue ne permet pas d'envisager un abaissement sensible des niveaux de crue sur le Rhin même, et la mauvaise exploitation des réservoirs de protection sur les affluents peut même nuire au fleuve. Sur les affluents du Rhin-Inférieur en particulier, la prudence s'impose en ce qui concerne l'implantation et l'exploitation de toute retenue

de protection de grandes dimensions. Par contre, dans les vallées, on pourra sans doute obtenir de bons résultats avec des barrages de retenue, bien qu'il soit prudent, même dans ce cas, de se limiter, en général, à encourager la construction de tels barrages par des contributions appropriées aux frais de construction de ces ouvrages.

« Les digues du Rhin-Inférieur ont pour la plupart bien servi, mais il sera nécessaire, afin de tenir compte de l'évolution économique continue dans les basses régions, de transformer certains polders de refoulement et polders d'été, en polders d'hiver clos. Toutefois, une grande prudence s'impose en ce faisant, afin d'éviter de surcharger le cours inférieur du Rhin. Il est très important pour le régime des crues du Rhin-Moyen et du Rhin-Inférieur, de ne pas barrer par des digues ceux des vieux Rhin qui sont encore ouverts.

« Le Service d'annonce des crues apportera dorénavant une contribution considérable à la limitation des dégâts dus aux inondations.

« On devra porter une attention toute particulière au dégagement permanent de la zone inondable et aux restrictions formulées par la police en ce qui concerne les zones de drainage des eaux de crue des cours d'eau. Là où les arrêtés de la loi sur les eaux ne suffiraient plus, il s'imposera de formuler partout des consignes de police spéciales dans les cas où de telles consignes n'existent pas encore. »

Notons avant tout, en ce qui concerne le troisième paragraphe ci-dessus, que les nombreux anciens bras du Rhin-Supérieur ne doivent pas être fermés aux eaux de crue.

6. — HIVERS DE GEL

Dans tous les lacs et les canaux (eaux statiques), la glace se forme à partir de la surface. Lorsqu'il gèle, la couche supérieure de l'eau est refroidie à environ 4°, de sorte qu'elle atteint la densité maximum et descend, étant remplacée par de l'eau moins froide provenant des couches inférieures. Ce cycle ne cessera que lorsque toute la masse d'eau aura atteint la température de 4°. En se refroidissant encore davantage, l'eau devient plus légère, restant finalement à la surface où elle se transforme en glace.

Par contre, dans une rivière, les masses d'eau turbulentes sont si bien brassées que les faibles différences des poids spécifiques des éléments de différentes températures ne peuvent plus jouer de rôle particulier. L'eau refroidie en surface de quelques fractions de degré au-dessous de 0° ne peut se transformer immédiatement en glace, à

cause des conditions mouvementées régnant dans l'écoulement libre. Ce n'est que lorsque les filets d'eau en état de suspension se heurtent au lit du fleuve et perdent ainsi la plus grande partie de leur vitesse, qu'ils se transforment en un ensemble désorganisé de fines « aiguilles » de glace — *la glace de fond* — qui adhèrent parfois sur le fond ou sur des objets submergés, formant un véritable revêtement de glace. C'est ainsi que, pendant l'hiver 1946/47, un scaphandrier en plongée à Cologne a pu constater que les débris de pont submergés dans le Rhin étaient déjà entièrement revêtus de glace, bien qu'aucun glaçon ne soit encore apparu au fil de l'eau.

Les mouvements des solides de décantation jouent également un rôle important dans la formation de glace. Il est un fait bien connu que dès qu'il y a de la glace de fond, l'eau trouble

d'une rivière devient plus claire. Lorsque la poussée d'Archimède de la glace de fond devient plus grande que l'adhésion la retenant au fond, elle remonte à la surface et commence à dériver. L'eau dans son sillage gèle, et il se forme d'abord des glaçons grands environ comme la paume d'une main, qui se réunissent et congèlent par la suite, devenant progressivement de plus en plus grands. Ils sont toujours couronnés d'une bordure de glace, formée par l'entrechoquement et les frottements incessants de ces glaçons entre eux à cause de la turbulence des eaux de la rivière.

D'autre part, il se forme simultanément sur la surface des affluents canalisés (Neckar, Main et Lahn), et surtout en amont des barrages de retenue, des quantités considérables de *glace compacte*. On rencontre sur le Rhin même et sur la Moselle assez tôt en hiver des surfaces continues de glace aux endroits bien protégés tels que parmi les épis et dans les ports. On brise la glace dans les ports aussi longtemps que possible en utilisant des engins appropriés, et en refoulant les débris dégagés dans le fleuve, afin de maintenir une entrée libre pour les bateaux cherchant à s'y réfugier. Au début, il ne dérive normalement que relativement peu de glace compacte dans les affluents et parmi les épis, à moins que de petites intumescences dans l'écoulement n'arrachent la glace des berges et ne la mettent en dérive. Par conséquent, au début de la période d'embâcle, on ne trouve que quelques glaçons compacts éparpillés parmi les glaces de fond relativement molles charriées par la rivière. Si le gel continue pendant une assez longue période, l'eau en écoulement se refroidit de plus en plus, la formation de glace de fond s'accroît rapidement, et les glaçons individuels congèlent à la surface, formant ainsi de grosses plaques de glace. En même temps, la glace des berges s'avance toujours plus loin dans le fleuve. Etant donné que la répartition des vitesses d'écoulement n'est pas du tout uniforme dans le Rhin, il y a des endroits où les glaçons en dérive arrivent si nombreux que le fleuve n'arrive plus à les dégager, de sorte qu'ils recouvrent très vite toute la surface du fleuve, congelant et formant une *nappe de glace entièrement fermée*. Dès que la glace ne se trouve plus en mouvement, la couche stationnaire croît rapidement vers l'amont, grâce aux glaçons en dérive qui y arrivent sans cesse. Il y a surtout deux endroits sur le Rhin où ce phénomène se reproduit toujours d'une façon très marquée :

Le *courant de flot* de la mer du Nord qui remonte surtout par le « Hollandsche Diep » et la « Nieuwe Merwede » et pénètre dans le Waal, arrête de temps à autre l'écoulement normal du fleuve, empêchant ainsi les glaçons en dérive d'aller plus loin. Pendant l'été, les glaçons,

TABLEAU IX

Hiver de gel	Durée du charriage (jours)	Glace fixe intermittente sur les parcours
1900-1901	30	km 554-547,3 Lorelei-en aval de Kaub.
1902-1903	22	—
1904-1905	15	—
1906-1907	31	—
1907-1908	22	—
1908-1909	21	—
1913-1914	14	—
1916-1917	26	—
1917-1918	13	—
1921-1922	10	km 968-777,5 Sliedrecht-Homberg
1928-1929	40	km 742-741 Düsseldorf km 634,6-634,8 Unkel km 554-513,3 Lorelei-Erbach km 512,3-482 Erbach-Nierstein km 480,6-470 Oppenheim-Gimbsheim km 456-377,6 Gernsheim-Sondernheim
1939-1940	40	km 977-811,7 Dortrecht-Büderich km 553,9-519,2 Lorelei-Oestrich
—	—	—
1940-1941	25	—
1941-1942	36	km 961-716 Werkendam-Monheim km 553,3-513 Lorelei-Erbach
1946-1947	55	km 961-792 Werkendam-Walsum km 554-506 Lorelei-Schiesrstein
1949-1950	9	—
1953-1954	27	km 985-825 Dordrecht-Xanten km 554-496 Lorelei-Mayence-Weisenau
1955-1956	26	km 554-475 Lorelei-Oppenheim

serrés les uns contre les autres, flottent pendant une assez longue période comme sur un lac, de sorte qu'il suffit d'un gel non forcément très accentué pour qu'ils se soudent, formant une couche continue de glace.

Le second endroit où les conditions sont extrêmement favorables à la formation d'une couche de glace stationnaire, se situe sur le parcours en amont de la *Lorelei*. Ici, le Rhin passe par un

FIG. 7. — Répartition des glaces sur le Rhin supérieur et le Rhin moyen

passage très étroit entre les monts d'ardoise du « Rheinisches Schiefergebirge », en décrivant des courbes serrées. En outre, dans ces monts très escarpés, la profondeur du lit dépasse 20 mètres par endroits, de sorte que la section d'écoulement est très grande, malgré sa largeur réduite, ce qui donne une vitesse d'écoulement très faible. Les glaçons en dérive arrivant sur ces lieux s'entassent sur cette superficie réduite, et le ralentissement du courant fait que le fleuve n'arrive pas à les évacuer en quantités suffisamment grandes. Si jamais des glaçons charriés provenant du Rheingau atteignent cette section montagneuse, c'est un signe pratiquement certain qu'il se formera sous peu une couche de glace solide entre les km 553 et 554 en amont de la Lorelei.

L'objet du tableau de synthèse (tableau IX) ci-après est de donner une vue d'ensemble des conditions de glace sur le Rhin à notre siècle.

Dans le tableau précédent, nous n'avons pas inclus les hivers pendant lesquels le charriage était faible et n'a duré que moins de 10 jours. Par ailleurs, les figures 7 et 8 montrent quels étaient les parcours pris par les glaces pendant

les six périodes de gel principales (1929, 1940, 1942, 1947, 1954, et 1955), en fonction des lieux et du temps. Pour établir ces figures, on a considéré les parcours où la couche de glace recouvrait la largeur entière de la rivière.

Les premières décennies du siècle actuel n'ont apporté que des hivers relativement doux, et même celui de 1928/29 n'a, du moins jusqu'à fin janvier, comporté aucun écart des températures normales. L'irruption du froid polaire du mois de février, avec des températures au-dessous de -20° , était tout à fait inattendu et a provoqué sur le Rhin une des formations de glace les plus gigantesques que l'on ait connues depuis plus d'un siècle, malgré la période relativement tardive de la saison. Contrairement à toutes les autres périodes de gel (à l'exception de l'hiver 1955/56) les températures sur le Rhin-Supérieur et le Rhin-Moyen étaient plus basses que celles du Rhin-Inférieur, de sorte que le fleuve s'est trouvé sous l'embâcle des glaces à la Lorelei dès le 10 février, alors qu'il n'a gelé que le 11 sur son cours inférieur.

Une caractéristique particulière de cet hiver glacial était que les glaces étaient stationnaires

FIG. 8

Répartition des glaces sur le Rhin inférieur

non seulement à la Lorelei et à la limite de la zone d'influence de la marée, mais encore à plusieurs autres endroits, dont notamment Gernsheim, Unkel et Düsseldorf, où on a pu constater la présence d'une couche stationnaire continue sur le fleuve. Il y a des boucles serrées en ces trois points, qui ont provoqué la formation intense de glace le long des berges, réduisant ainsi la section d'écoulement en surface. Il s'est produit à plusieurs reprises des embâcles totales de courte durée à Unkel et à Düsseldorf, le 22 février 1929, et un « bouchon » de glace s'est formé, que l'on a pu toutefois dégager le même jour en l'attaquant aux explosifs. Par contre, le « bouchon » formé à Gernsheim le 18 février a provoqué l'accroissement continu de l'embâcle sur le Rhin-Supérieur jusqu'en amont de

Sondernheim (fig. 7). Depuis les travaux de régularisation effectués à Gernsheim, comprenant des terrassements et des remblayages des rives pour adoucir la boucle serrée, et l'uniformisation de la pente, il n'y a plus eu de formation de glace en cet endroit. La période de gel de janvier-février 1942 a contrasté très nettement avec celle de l'hiver 1928/1929. Une forte gelée s'est déjà produite dès les premières semaines du mois de janvier, avec des minima de -21° pour le Rhin-Moyen, et -25° pour le Rhin-Inférieur. En aval de Gorinchen sur le Waal, la rivière a gelé complètement le 16 janvier, et la couche de glace s'est étendue exceptionnellement vite vers l'amont, de 20 à 25 km par jour en moyenne. Ce ne fut que lorsque le Rhin gela à la Lorelei 8 jours plus tard (le 23 janvier), que le charriage des glaçons provenant du Rhin-Supérieur cessa, réduisant la vitesse d'avancement de la couche à environ $1/5^{\circ}$, soit 4-5 km par jour, et plus tard avec des vitesses encore plus faibles. La limite amont de la couche de glace sur le Rhin-Inférieur (km 716, près de Monsheim) fut atteinte le 22 février 1942.

Alors que la longueur totale du parcours pris par les glaces en 1929 (environ 350 km) se partageait à peu près également entre le Rhin-Inférieur et le Rhin-Moyen, la conséquence du retard de gel à la Lorelei en 1942 était que, sur une longueur de parcours gelé totalisant 285 km, 245 km se trouvaient sur le Rhin-Inférieur, et seulement 40 km sur le Rhin-Moyen. C'est ainsi que le port de Duisburg-Ruhrort n'était pris par les glaces que pendant 5 jours en 1929, mais par contre pendant 38 jours en 1942.

L'hiver 1946/47 s'est caractérisé par l'arrivée très prématurée de la gelée. Bien que les températures extrêmes n'aient jamais atteint les basses valeurs des hivers rigoureux de 1929 et 1942, le Rhin a néanmoins gelé entièrement trois fois à la Lorelei pendant ce même hiver de 1946/47, ce qui constituait un événement sans précédent.

L'hiver 1955/56 a commencé très tard dans la totalité du bassin du Rhin, apportant des grands froids au début et dans la deuxième décade du mois de février. Les températures dans la partie méridionale du bassin sont toujours restées au-dessous de celles du bassin septentrional, de sorte que seule la Lorelei a été prise par les glaces, mais par contre jamais le Rhin-Inférieur.

Exception faite de ces particularités, toutes les périodes de gel du Rhin montrent toujours les mêmes caractéristiques pour les différents parcours du fleuve. La figure 9 représente une partie du parcours montagneux en amont de la Lorelei, les profondeurs étant indiquées en intervalles de 2,5 m, par rapport au niveau des basses eaux (E.E.). On retrouve des profondeurs exceptionnelles (pour le Rhin) de plus de 10 m du

FIG. 9. — Le Rhin à la Lorelei

Geisenrücken jusqu'à la Lorelei. Le plan d'eau large de 250-300 m en amont de ce parcours se rétrécit à 120 m au Betteck, où l'on a également la plus grande profondeur, de plus de 20 m. Sur le parcours de Geisenrücken à la Lorelei, les glaçons charriés pendant un hiver rigoureux finissent toujours par s'entasser et être finalement emprisonnés. Si le débit est particulièrement faible, il en résulte des conditions favorisant la formation de glace le long des berges, de sorte qu'il peut arriver que le fleuve soit déjà totalement pris au Kammereck comme en 1942; or, bien que ceci ne se produise normalement qu'entre Kammereck et la Lorelei, les circonstances y jouent toutefois un rôle. Bien des efforts ont été faits pour empêcher les formations de glace stationnaires, ou au moins pour les retarder.

Il est pratiquement impossible de limiter la formation de glace le long des rives par l'emploi de brise-glaces, étant donné que les profondeurs d'eau au voisinage des berges sont dans la plupart des cas trop faibles pour permettre à ces engins d'approcher. Des équipes travaillant aux explosifs ne rencontrent guère de succès au début de la période de formation, car la glace est

encore trop mince pour les porter. Même si on fait sauter la glace plus tard, on constate que les morceaux que l'on a réussi à détacher n'ont aucune tendance à dériver, étant refoulés vers la rive par la masse dense des glaçons charriés par la rivière, et là ils ont vite fait de se « resouder ».

Une fois que la rivière est recouverte d'une couche continue, les glaçons glissent en-dessous de cette couche et s'y heurtent en quantités toujours plus grandes et le parcours rocheux entier du Rhin finit par prendre l'aspect d'une région polaire.

La figure 10 est une prise de vue obtenue en 1929 près d'Oberwesel, mais pourrait tout aussi bien représenter une autre partie quelconque du parcours rocheux, ou dater d'une autre période de gel.

La plupart des glaçons entraînés sous la couche de glace par le fort courant restent bientôt attachés à la surface inférieure rugueuse de cette couche, réduisant ainsi la section d'écoulement de plus en plus, jusqu'à ce qu'il se soit formé une véritable barrière de glace. Le niveau en aval de cette embâcle, au limnimètre à Saint-Goar, baisse rapidement, tandis qu'il monte tout aussi rapidement en amont, jusqu'à ce que la

FIG. 10
Glaçons à Oberwesel (1929)

suppression en amont permette à l'eau de se frayer un nouveau passage au-dessous de la glace. Pendant la baisse très rapide en aval, il y a toujours un gros risque que les bateaux se trouvant dans les ports de refuge, surtout s'ils sont chargés, arrivent à reposer sur le fond et à subir des avaries. C'est pour cette raison que la cote du fond du port de refuge national situé immédiatement en aval de la Lorelei est d'environ 50 cm au-dessous de la cote du lit nominal du Rhin.

L'hiver de forte gelée de 1939/40 présente le meilleur exemple de l'importance de la restriction de l'écoulement pouvant être provoquée par une embâcle des glaces. En effet, pendant cet hiver où les accumulations de glace étaient extrêmement importantes, le plan d'eau s'est trouvé surélevé par « endiguement », des valeurs suivantes, par rapport à sa cote normale : 3,30 m à Oberwesel, 4,90 m à Bacharach, et 5,60 m à Trechtingshausen. Dans le dernier cas, la cote a dépassé de presque 1 m la cote de crue maximum du fleuve enregistrée en 1883. Les maisons riveraines à Assmannshausen ont été inondées, et de gros glaçons se sont déposés sur la route de la rive droite d'Assmannshausen à Lorch, paralysant pendant longtemps la circulation.

Bien que déjà importants en eux-mêmes, les dommages causés aux riverains par l'accumulation des glaces sont encore dépassés par ceux occasionnés par la *débâcle*. Tout dépend des conditions météorologiques, dans ce dernier cas : Si, comme cela se produit normalement, la débâcle est déclenchée par l'arrivée d'air chaud des régions maritimes, alors que les températures dans les montagnes du Rhin-Supérieur restent encore hivernales, il n'y a aucun danger

pour les basses régions; mais si, par contre, un adoucissement du temps, accompagné de pluies et d'une fonte rapide de la neige se produit simultanément dans toute la partie sud du bassin du Rhin, il est alors difficile d'éviter des conditions catastrophiques. L'arrivée subite des eaux de crue démolit la couche de glace avec une force terrible, amoncelant les débris contre la barrière de glace, et lorsque celle-ci ne peut plus résister à la pression énorme des apports d'eaux torrentiels, elle cède brusquement, libérant ces eaux vers l'aval. Le mois de février 1784 s'est caractérisé par la plus terrible crue de débâcle, et par conséquent, par les niveaux les plus élevés que l'on connaisse encore aujourd'hui. La cote à Coblenz atteignit 10,20 m, dépassant de 90 cm la cote maximum de 9,30 m enregistrée en janvier 1926, lorsque le fleuve n'était pas gelé, et la cote à Cologne constitua aussi le record pour toutes époques. Cette crue exceptionnelle provoqua d'énormes dégâts de Coblenz jusqu'aux Pays-Bas, inondant totalement les villes de Ruhrort, Buderich, Kalkar, Grieth, Emmerich ainsi que 83 villages. La plupart des digues de protection furent submergées et rompues à plusieurs endroits. Il est également certain que cette crue a dû être précédée dans l'Histoire, par une série de catastrophes analogues, ainsi que le démontrent tous les vieux bras du fleuve, qui témoignent des importants changements de lit du Rhin dus à des catastrophes au cours de son existence, et des dangers auxquels étaient exposés les habitants des basses régions.

Heureusement la débâcle s'est toujours produite sans danger au cours de ce siècle. Bien que ceci soit sans doute dû surtout aux conditions météorologiques favorables, les mesures prises par les administrations fluviales et de navigation pour rétablir de saines conditions d'écoulement en assurant le passage libre des glaces, en sont sans doute également en partie responsables.

La débâcle du début du mois de mars 1956 a présenté un intérêt tout particulier. Alors qu'en aval de Coblenz, toute la glace provenant du parcours montagneux et de la Moselle s'amoncelait sous la forme d'une couche continue s'étendant d'une rive à l'autre pendant une journée entière de vingt-quatre heures, à Emmerich par contre, on se rendait encore à peine compte du fait que le fleuve charriait de la glace. Le vent d'ouest, qui soufflait très fort ces jours-là, avait repoussé la plus grande partie de la glace sur les zones riveraines inondées, où elle fondait très vite par la suite.

Si le gel dure longtemps, il se forme sur le parcours montagneux, d'abord entre Oberwesel et Kammereck, des espèces de « ravins » (« Kändel ») dans la glace. Pendant son long trajet sous la glace recouvrant la surface, l'eau

Fig. 11
Formation
d'un
« Käusel »
au
P.K. 552,8
(1954)

ne peut plus être refroidie davantage par le vent ou par rayonnement, mais se trouve même réchauffée par les eaux souterraines pénétrant dans le lit du Rhin par les fissures du Schiefgebirge. La forme irrégulière du lit du fleuve dévie à certains endroits le courant principal vers le haut, contre la couche de glace en surface; l'eau relativement chaude décompose celle-ci, et il se forme d'abord par endroits de petites zones libres de glace, qui finissent par se joindre,

formant une étroite rigole ouverte, un soi-disant « Kändel », lequel est le plus souvent bordé de murs de glace de l'ordre d'un mètre de haut.

Pendant la formation du « Kändel », le bouchon de glace entre Kammereck et Betteck est souvent encore épais de 10 m ou plus. L'eau émergeant de dessous ce bouchon, à une haute pression, donne lieu à des courants de retour qui gênent considérablement les travaux des brise-glaces, en limitant leur mobilité et en em-

Fig. 12
Chenal
continu
jusqu'à
Oberwesel
(1954)

FIG. 13. — Brise-glace « Reiher » et « Strombaudirektor Nobiling ».

pêchant l'entraînement vers l'aval des glaçons libérés. L'administration chargée de l'aménagement du Rhin ne disposait à l'origine d'aucun brise-glace, mais en 1929, le service de remorquage de Duisburg mit en œuvre plusieurs remorqueurs appartenant au monopole d'Etat. Ceux-ci descendirent le parcours non gelé de Duisburg à Saint-Goar, d'où ils opérèrent par la suite. Etant très maniables et dotés de moteurs très puissants, ces remorqueurs se prêtaient extrêmement bien à ce genre de travail, et, grâce à la compréhension et l'intérêt portés à leur tâche peu banale par leurs équipages, ils exécutèrent un travail exceptionnel. Leur première tâche fut l'élimination du bouchon de glace à la Lorelei, jusqu'à l'eau libre du « Kändel », réduisant ainsi déjà appréciablement l'effet d'endiguement de la glace. Ensuite, ils élargirent le « Kändel » et dégagèrent le port d'Oberwesel de la glace qui le bloquait. A la suite de ces expériences, les administrations se sont procuré des brise-glace pour leur propre compte et les ont mis en œuvre.

L'emploi des *explosifs* pour essayer de disloquer la masse conglomérée des glaces de fond

(ressemblant à de la neige tassée) près de la Lorelei n'a rencontré pratiquement aucun succès. Les charges isolées ne réussissaient qu'à ouvrir des cratères, sans pouvoir fendre la « purée » très résistante. On a ensuite travaillé avec des charges « en série », 15 - 20 charges, d'environ 15 kg de « Donarit » chacune, étant disposées à 10 - 15 m l'une de l'autre, toutes sous la glace, et déclenchées simultanément par contact électrique. Précisons toutefois que cette méthode n'a été employée que pour aider les brise-glace à avancer, en cet endroit, d'environ 50 - 100 m. par jour.

Pendant les dernières périodes de gel, on a, en outre, déclenché des charges à retardement en séries de 10 - 20 à la fois, ce pour allonger le « Kändel » constamment vers l'amont dans l'axe de l'écoulement.

Ces opérations diminuent en premier lieu l'effet de retenue de la glace, réduisant ainsi le danger menaçant les habitations, voies de communication et autres installations à l'amont. D'autre part, elles mettent à la dérive une bonne partie des masses de glace « emprisonnées » par les montagnes, et ce en petites quantités à la fois,

donc sans danger. Toutefois, le résultat le plus important est que la voie d'écoulement ouverte de cette manière facilite la débâcle et l'entraînement progressifs du reste des masses de glace.

D'importantes formations de glace de fond ne peuvent plus se produire actuellement dans les parcours aval des affluents canalisés (*Neckar*, *Main*, *Lahn*, et plus tard également la *Moselle*), car l'eau tranquille dans les réservoirs se couvre rapidement d'une nappe de glace compacte; en outre, les parcours en aval des barrages, dans lesquels il existe encore un certain courant, et dont la turbulence entraîne vers le fond les eaux en surfusion, sont trop courts pour donner lieu à des formations de glace de fond importantes. De plus, étant donné que l'évacuation des glaces peut être réglée dans de larges limites, grâce aux barrages déversants, on a pu, pendant les périodes de gel des dernières décennies, évacuer les glaces de ces rivières vers le Rhin au moment où on savait qu'elles ne pouvaient plus y provoquer des dégâts. Toutefois les conditions ont été jusqu'à maintenant moins favorables dans la *Moselle*. Il s'y produisait, tout comme dans le Rhin, des formations considérables de glace de fond. La rivière était entièrement prise par les glaces, avec de fortes accumulations presque tous les hivers de gel, surtout à Lay (km 9), Eller (km 76), Traben-Trarbach (km 106) et Mehrling (km 169), tous situés sur son parcours allemand. Alors que les glaces charriées par le Rhin sur son parcours montagneux ne parviennent généralement au Rhin-Inferieur que sous la forme de quelques glaçons de faible importance, la Moselle par contre avait l'habitude de presque toujours rompre toutes ses glaces à la fois par une seule onde de crue plus ou moins importante, apportant ainsi au Rhin des glaçons parfois encore très grands, en masses denses. En 1929, les glaces charriées par la Moselle se sont heurtées aux glaces encore solides du Rhin à Götterswickerhamm, où elles ont provoqué en quelques heures seulement une accumulation très dangereuse qui a fait monter le niveau de 3 m (voir fig. 14). La limite de l'embâcle des glaces du *Rhin-Inferieur* correspond dans la règle à la limite de la zone des marées, et le volume de glace augmente rapidement vers l'amont, à cause des glaçons charriés; toutefois les accumulations de glace sont généralement plus rares ici que sur le parcours montagneux, étant donné que les variations du régime d'écoulement sont moins brusques. S'il vient à se produire ici des accumulations, ce n'est pas généralement parce que des glaçons individuels sont repoussés sous la couche superficielle, réduisant ainsi progressivement la section d'écoulement, mais plutôt à cause des poussées de glace. Ces poussées sont surtout susceptibles de se produire à la fin d'une période de gel, lorsque la nappe

superficielle est déjà devenue molle par endroits et n'est plus en mesure de résister à la poussée des masses de glaces arrivant de l'amont. Ce processus est favorisé en certains endroits par les eaux industrielles relativement chaudes qui se déversent dans le Rhin. A l'endroit de la rupture les débris de la couche superficielle disloquée circulent sur place d'une manière confuse et désordonnée, obturant la section d'écoulement et provoquant la remontée rapide du plan d'eau. Il est pratiquement impossible de lutter contre ce genre d'accumulation, puisqu'en aval, le fleuve est encore recouvert dans la plupart des cas d'une couche superficielle continue d'une longueur de parfois 100 km ou davantage.

Tout essai d'attaquer cette couche à partir de l'amont serait non seulement une action inconsidérée, exposant les embarcations en service et leurs équipages à des risques considérables, mais encore elle favoriserait et renforcerait les dangereuses accumulations de glace. Mais il est par contre possible, même dans des conditions de gel persistant, de briser et de disloquer la couche superficielle à partir de l'aval, où les glaçons ainsi libérés peuvent partir à la dérive. Les conditions ne favorisent alors plus de nouvelles accumulations, étant donné que la couche encore en existence en amont retient tous les glaçons charriés de l'amont, et isole de l'air froid l'eau encore en écoulement, l'empêchant de se refroidir davantage, de sorte qu'il ne peut plus se former de glace de fond, même si la couche superficielle est très étendue.

C'est pour cette raison que la réalisation de la

Fig. 14

Poussée des glaces à Buderich (P.K. 811) (1929)

« débâcle artificielle » sur le Rhin-Inférieur est entièrement l'affaire de l'Administration fluviale néerlandaise, dont les brise-glaces ont si souvent assuré l'évacuation sans danger des glaces sur le parcours allemand, en disloquant la glace de manière efficace jusqu'au-delà de la frontière entre les Pays-Bas et l'Allemagne.

Lorsque survient le dégel, les apports d'eau de tous les petits ruisseaux et des affluents issus du « Mittelgebirge » deviennent plus abondants et le plan d'eau du Rhin-Inférieur remonte, soulevant la couche de glace superficielle, qui n'étant alors plus ancrée aux rives, se met en mouvement. S'il existe encore une importante couche de glace sur de longs parcours en aval, il risque de se produire une accumulation avec toutes ses conséquences néfastes; si, par contre, le fleuve est déjà libéré en grande partie de l'embâcle des glaces en aval, il n'y a alors plus de danger très grave.

La couche de glace commence peu à peu à se mettre en mouvement, s'arrêtant ensuite quelque temps jusqu'à ce que les eaux de crue l'emportent de nouveau encore un peu plus loin. Il se forme peu à peu devant les deux rives, « une ligne de glissement » étendue, caractérisée par des glaçons dressés sur leurs bords et des blocs de glace échoués. Ceci marque le début de la débâcle des glaces, et la totalité de la couche superficielle, qui peut souvent, en aval de Wesel, présenter une surface continue sans fentes ni fissures de 100 m de long et de large, se trouve soudainement entraînée vers l'aval à une vitesse de 2 à 3 m/s.

Grâce aux conditions météorologiques favorables et aux excellents travaux de préparation du Service fluvial néerlandais, la débâcle des glaces sur le Rhin-Inférieur s'est toujours déroulée de façon analogue pendant ce siècle, de sorte que les dégâts provoqués par les hivers de gel ont été beaucoup moins sévères que les catastrophes d'autrefois. Dans les cas où il apparaît nécessaire d'arrêter la navigation par suite d'un accroissement continu du charriage et de la présence de couches de glace superficielles, elle ne peut généralement être reprise qu'après la débâcle de la Moselle, et après l'évacuation par le fleuve des glaçons compacts, parfois de taille encore appréciable, provenant du Main. Le plus long arrêt total enregistré pour le Rhin-Inférieur s'est produit en 1946/47, s'étendant sur 58 jours. Bien que de telles conditions entraînent forcément des pertes de fret et des faux-frais considérables pour les exploitants de la navigation fluviale, l'importance du préjudice causé aux industries dont les marchandises restent « figées » en cours de route sont difficiles ou même impossibles à chiffrer. Il faut encore y ajouter les pertes dues aux avaries souffertes

par les divers bateaux pendant les hivers de gel, la détérioration des installations portuaires, etc.

Tous les ponts sur le Rhin, et presque tous ceux sur les divers affluents étaient en ruines à la fin de la deuxième guerre mondiale. Afin d'assurer la reprise de la circulation aussi rapidement que possible, les puissances d'occupation et les Allemands eux-mêmes ont établi sur pieux en bois plusieurs ponts de fortune dont le peu de résistance aux glaces a été démontré d'une manière éclatante pendant l'hiver 1946/47. Bien que les brise-glaces disposés devant la plupart des piliers de ces ponts aient au début réduit et retardé l'effet destructif des glaces, ils n'ont en aucun cas constitué une garantie sûre de la capacité de résistance de ces ouvrages.

Le 14 janvier 1947, les pieux en bois du pilier auxiliaire du pont de chemin de fer sur la Moselle à Coblenz ont été « sciés » par de lourds glaçons en dérive, provoquant l'effondrement de la superstructure et l'interruption du trafic ferroviaire entre Cologne et Mayence. Le 24 février, les glaces de la Moselle en débâcle et de fortes quantités de glace en dérive provenant du parcours montagneux du Rhin se sont heurtées au pont sur le Rhin à Neuwied. Les brise-glaces situés devant plusieurs piliers ayant soit subi des dommages considérables, soit été détruits ou déplacés, les piliers eux-mêmes n'ont plus pu résister, et le pont s'est effondré. Par ailleurs, pendant la 3^e gelée de l'hiver 1946/47, deux piliers en pieux du pont routier Nassau sur le Lahn ont été « sciés » par les glaçons, et le pont s'est effondré.

Au début de la période de gel, on n'a pas eu suffisamment de temps pour démonter le pont routier flottant (pont Freeman) à Düsseldorf, pour le mettre en lieu sûr. Or, même avant que l'on ait pu parler d'un véritable charriage de glace, il s'est formé de la glace « mousseuse » devant les larges pontons du pont qui obturaient plus du tiers de la largeur du fleuve; cette formation s'est vite transformée en une très grande couche fixe, ne laissant plus qu'une seule petite ouverture libre dans le chenal de navigation. L'ancrage du pont ne put résister à la pression de la glace et commença à céder, et le 21 décembre 1946, le pont, qui décrivait alors déjà une courbe très prononcée vers l'aval, se disloqua complètement. Cinq des pontons situés à gauche de la berge de navigation se mirent en dérive, entraînant la superstructure qui les reliait entre eux, ainsi que la superstructure de la passe navigable, cette dernière faisant en quelque sorte office d'ancre flottante. Toutefois, depuis le remplacement des ponts de fortune d'après-guerre par des ponts solides aux piliers massifs, des dégâts comme ceux de l'hiver 1946/47 ne sont plus à craindre.

7. — LE SERVICE HYDROLOGIQUE

Ce service est aussi important et indispensable pour l'ingénieur fluvial que le diagnostic l'est pour le médecin. Ce n'est qu'en connaissant avec précision les hauteurs caractéristiques, la pente, la vitesse du courant, les débits liquides et solides, ainsi que leurs influences mutuelles et sur l'évolution du lit, que l'ingénieur fluvial a la possibilité d'intervenir rationnellement et avec succès dans les phénomènes naturels lorsqu'il se produit des conditions dangereuses ou indésirables.

Le service hydrologique se bornait à l'origine à l'observation et l'enregistrement des *cotes du plan d'eau*; à cet effet des échelles limnimétriques furent prévues en de nombreux endroits le long des rives, leur cote 0 étant normalement au-dessous de la cote minimum enregistrée jusqu'alors. On possède aujourd'hui les observations quotidiennes de certaines de ces échelles pendant plus de 130 années. Aujourd'hui, toutes les stations limnimétriques principales du Rhin sont équipées de limnigraphes, et sont pour la plupart également reliées par un système de télécommunication électrique à la prochaine station de service du Département d'administration fluviale et de navigation (Wasser-und Schifffahrtsverwaltung). Les cotes relevées à 5 heures sont radiodiffusées aux armateurs tous les matins, leur permettant ainsi de décider jusqu'à quelle profondeur ils peuvent charger leurs bateaux. On envisage de mettre au point ce système de télécommunication de sorte que les cotes relevées aux limnimètres principaux puissent être enregistrées couramment dans deux stations centrales. Ceci éliminerait non seulement les échanges d'informations téléphoniques concernant les cotes, telles qu'elles se font actuellement, mais encore accélérerait la transmission des données à la station de radiodiffusion. En particulier, ce système serait surtout avantageux pour les services des crues et des glaces; nous en parlerons d'une manière plus détaillée par la suite.

Malgré sa grande valeur et son intérêt indiscutable, la seule observation des cotes aux échelles principales ne suffit pas toutefois pour la reproduction des modifications du lit fluvial sur 20 à 50 km séparant les stations limnimétriques principales. Pour cela, seuls des *nivellements du plan d'eau* peuvent fournir des données convenables. Toutefois, un levé de la surface entière, dans lequel on relève le plan d'eau en chaque point hectométrique le long des deux rives, exige des prestations de personnel et des dépenses considérables. De plus, on ne peut s'attendre à des résultats utiles que si les

mesures sont exécutées lorsque les cotes sont « stables », c'est-à-dire ne varient guère de plus de 3 cm en 24 heures, dans un sens continu ou dans l'autre. Puisqu'il est impossible de relever simultanément toutes les cotes de 100 m en 100 m le même jour, on enfonce d'abord près de la rive, de petits pieux en bois en notant ensuite simultanément, à partir des bords supérieurs de tous ces pieux, le plan d'eau à un moment prédéterminé. On peut niveler ces pieux-mêmes par rapport au point repère le plus proche en toute tranquillité avant ou après cette opération.

Afin de pouvoir réduire autant que possible dans le temps le nombre de ces levés si pénibles et onéreux, et de ne devoir les faire que pour des niveaux différents du plan d'eau, on a prévu un dense réseau *d'échelles auxiliaires*, complétant les stations principales. Ces échelles auxiliaires sont éloignées de 1 - 3 km l'une de l'autre, suivant les formes du lit et la position des points de changement de pente. Il va de soi que l'état et surtout le calage en altitude de toutes ces échelles doivent être vérifiés régulièrement, afin d'éviter qu'elles ne perdent leur utilité et que les données qu'elles fournissent ne conduisent à des conclusions erronées.

Pour la détermination des débits (m^3/s), on exécute de nombreuses mesures de vitesses au moulinet sur une très large gamme de niveaux du plan d'eau. Le nombre de tours du moulinet est transmis à un appareil enregistreur par des contacts électriques. Les jaugeages des débits jusqu'au-delà de la hauteur moyenne du plan d'eau se font toujours sur les mêmes sections de mesure; ces dernières sont situées pas trop loin de la station limnimétrique principale, dans une partie étroite du parcours ne comportant aucun changement brusque de section. On divise, en fonction de la largeur du plan d'eau et du temps disponible, le profil du fleuve en éléments de 5 à 30 mètres de large; le moulinet est alors suspendu à partir du bateau de jaugeage, ce dernier étant placé successivement sur l'axe médian de chacun de ces éléments. Des mesures ponctuelles (c'est-à-dire la mesure de la vitesse du courant en des points individuels — par exemple 0,20; 0,50, 1,00, 2,00, et 2,80 m au-dessus du fond, et le point final à 10 cm au-dessous de la surface de l'eau) ne se font plus que très rarement et pour des besoins particuliers. Normalement, on fait descendre le moulinet à partir de la surface à une certaine vitesse — le plus souvent 2 cm/s — jusqu'au fond (mesure par intégration) déterminant par la suite la vitesse d'écoulement moyenne sur la verticale de mesure, et le débit par unité de temps s'écoulant par l'élément en

question, à partir du nombre total de tours de l'hélice du moulinet. Grâce aux appareils enregistreurs entièrement automatiques installés sur les nouveaux bateaux de jaugeage « Walter Türk » et « Niederrhein », le dépouillement des mesures est devenu beaucoup plus simple. En période de crue, le fleuve et en particulier le Rhin-Inférieur, déborde de son lit mineur aux points de mesures habituels, inondant des lits majeurs étendus, de sorte que les jaugeages de débit deviennent très pénibles et peu sûrs, sinon impossibles à exécuter. Dans ces conditions, on les effectue le plus souvent à partir des ponts, puisque le fleuve entier y est contenu en un profil fermé.

Dans le cas où l'on dispose d'un nombre important de jaugeages de débit pour les basses, moyennes et hautes eaux, on en tire « la courbe de débit » pour la station limnimétrique principale voisine, à partir de laquelle on peut alors déterminer le débit correspondant à n'importe quelle hauteur d'eau. Cette relation n'est toutefois exacte que lorsque les niveaux sont stables. Si le Rhin a tendance à monter, la pente devient plus grande, et donc également la vitesse d'écoulement au droit de la station limnimétrique. Un plus grand volume d'eau s'écoule donc dans ces conditions, et réciproquement un plus faible volume lorsque le niveau tend à baisser. Toutefois, même si les variations de niveau sont considérables, ces écarts ne dépassent que rarement les 5 % et n'interviennent guère à vrai dire, dans les cas pratiques. Etant donné les modifications assez considérables du lit du Rhin qui se produisent tout le temps aux différentes stations limnimétriques principales, il est nécessaire de répéter les mesures couramment et d'établir de temps en temps de nouvelles courbes hauteur/débit.

Pour la quasi-totalité de ses travaux, et surtout en ce qui concerne la réalisation et l'entretien du chenal navigable, l'ingénieur fluvial utilise la base de la « hauteur équivalente », (E.E.), dont la signification et la détermination ont déjà été décrites à la page 134. À l'aide du nivellement du plan d'eau dont nous avons parlé plus haut, on a pu relier les points de E.E. des stations limnimétriques principales par une ligne continue caractérisant l'E.E., de sorte que l'agent sur les lieux peut toujours s'assurer de la hauteur du lit nominal du chenal navigable par rapport au niveau normal (NN = niveau de référence employé en Allemagne) en n'importe quel point, et se rendre compte si la profondeur minimum d'eau requise est effectivement disponible.

Des sondages transversaux sont effectués normalement tous les 5 ans en tous les points hectométriques. La construction des courbes d'égale profondeur, qui représentent très nettement la

totalité du lit du Rhin sur les cartes du fleuve, et permettent une certaine comparaison avec les anciennes configurations de ce lit, est basée sur des milliers de profils en travers du fleuve. Ces sondages s'effectuent actuellement pour la plupart au moyen d'un « Radiolog », ou sondeur à échos avec bande d'enregistrement; l'avance du papier est réglée par un deuxième sondeur à échos émettant sur le plan horizontal, de façon à ce qu'elle corresponde toujours à la distance à laquelle on se trouve de la rive. Cet appareil permet d'obtenir une image immédiate et sans distorsion du lit du fleuve à travers la section sondée.

Exception faite de la diffusion quotidienne des niveaux par la T.S.F., le service hydrologique poursuit en temps normaux ses activités discrètement et à l'abri de l'attention publique, et ce n'est qu'en période de danger de crue ou de glace que le *Service spécial d'avertissement et d'information* spécialement conçu pour ces conditions s'attire l'intérêt général. Dès que le niveau atteint une cote d'alerte, ce Service avertit tous les autres services intéressés, tels que syndicats des digues, administrations et postes de service, une ou plusieurs fois par jour, au moyen des télégrammes « WOBS » (Wasserobservations-telegramm = Télégramme d'observations sur l'état des eaux), et tient en outre le grand public au courant des cotes enregistrées aux stations principales par T.S.F., indiquant les tendances (hausses ou baisses). Ces données sont normalement complétées par des *prévisions* à court terme (10 à 24 heures) pour quelques localités importantes. Les essais que l'on a souvent faits, d'émettre des prévisions à long terme, n'ont jamais donné des résultats satisfaisants, étant donné l'influence de plusieurs facteurs inconnus ou peu sûrs, tels que l'importance des précipitations dans le bassin de réception global, la température de l'air, le niveau de la nappe phréatique, la hauteur et la teneur en eau de la couche de neige, l'état de la surface du sol du point de vue pouvoir d'infiltration, etc.

Les prévisions de l'administration fluviale et de navigation ne se basent donc sciemment que sur l'observation sûre d'un faible nombre de stations limnimétriques situées à l'amont. On mettait autrefois la cote relevée par ces « stations de départ » en relation directe avec la cote de l'échelle limnimétrique employée pour les prévisions, cela au moyen de « courbes de relation ». Toutefois, de telles relations n'indiquent, selon la règle, la relation entre les cotes de deux échelles différentes que lorsque les conditions sont stables, c'est-à-dire lorsque le débit reste constant pendant quelque temps. Si le niveau est en train de monter ou de baisser, on peut souvent constater des écarts considérables de cette ligne, et si l'on doit également tenir compte

de l'influence d'un affluent situé entre les deux stations, on a, au lieu d'une ligne unique, toute une famille de relations. La méthode devient complètement inabordable lorsque plusieurs affluents d'ordre majeur se jettent dans le fleuve sur le parcours partiel en question, comme entre Mayence et Andernach.

Autrefois l'administration chargée de l'aménagement du Rhin avait déjà essayé très tôt de baser ses prévisions des crues sur les débits au lieu de les dériver directement des cotes enre-

gistrées sur les limnimètres de référence. Cette méthode a été mise au point par la suite et l'Administration des Eaux et de la Navigation du Rhin établit, depuis 1941, ses prévisions sur la base des variations de débit.

Si, par exemple, nous admettons que le temps d'écoulement de Mayence à Andernach est de 16 heures, nous voulons dire que l'eau passant aujourd'hui à 8 heures par Andernach est passée par Mayence hier à 16 heures, où lui correspondait une certaine cote de niveau. Mais puisqu'a

FIG. 15. — Bateau de mesures « Walter Türk »

8 heures ce matin, on y a relevé une cote supérieure à celle de 16 heures d'hier, le débit à Mayence a dû augmenter entre temps de, mettons $80 \text{ m}^3/\text{s}$, et 16 heures plus tard, c'est-à-dire cette nuit à 24 heures, le débit à Andernach devra également augmenter de ces $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Nous tirons alors le débit correspondant à la hauteur enregistrée à 8 heures ce matin, de la courbe hauteur/débit pour Andernach; nous y ajoutons alors $80 \text{ m}^3/\text{s}$, et réciproquement, nous déterminons ensuite de cette valeur la hauteur probable à 24 heures aujourd'hui. Pour cette opération, il faut, bien entendu, également tenir

compte des apports des rivières Lahn, Nahe et Moselle de la même façon.

Une certaine erreur s'introduit dans ce calcul parce qu'on ne tient pas compte de certains petits affluents, et parce que, à niveau montant, une partie de l'eau passant au droit du limnimètre de référence est retenue, soit dans d'anciens bras du fleuve, soit en s'écoulant vers la nappe avant qu'elle ne puisse atteindre le limnimètre de base des prévisions. Dès que le niveau commence à s'abaisser, cette eau recommence à s'écouler des anciens bras, et plus tard, de la nappe dans le fleuve. Avec la méthode de repré-

ANNEXE

HAUTEURS D'EAU ET DÉBITS CARACTÉRISTIQUES DU RHIN DE BALE A EMMERICH

Station limnimétrique	Distance du pont du Rhin à Constance km	Bassin de précipitation km²	Cote O de l'échelle NN + n. S m	Depuis 1900			Période 1946-1955			Débit moyen		Depuis 1900			E.E. 1952 m
				NNW cm	Dates	NNQ m³/s	MNW cm	MW cm	MHW cm	MQ m³/s	Période	HHW cm	Dates	HHQ m³/s	
Bâle (embarcadère) . . .	166,7	35 929	243,90	— 89	30- 1-33	—	42	125	317	10	1808-1955	473	16- 6-10	(4 300)	—
Kembs (barrage)	Cote de retenue au-dessus du NN=244,00														
Rheinweiler	186,2	36 736	217,24	114	plus. fois 12-53	—	131 ¹⁾	217 ¹⁾	648 ¹⁾	—	—	1 070	16- 6-10	—	—
Neuenburg	199,6	36 939	206,04	125	1-11-47	—	165	284	528	—	—	920	16- 6-10	—	—
Brisach	225,6	37 575	184,52	37	10-11-47	—	79	189	434	—	—	706	16- 6-10	—	0,75
Sasbach	240,4	37 736	171,19	123	3- 1-54	—	166	284	531	—	—	684	17- 6-10	—	—
Ottenheim	270,6	39 396	147,30	146	27-12-20	—	226	330	526	—	—	625	26-11-44	—	—
Marlen	288,2	39 561	135,39	123	10-11-47	272	160	280	498	1 060	1934-55 ²⁾	596	16- 1-55	(3 660)	—
Strasbourg	294,9	39 650	131,42	65	3-11-47	—	128	248	470	—	—	(580)	26-12-18	3 890	1,40
Grauelsbaum	316,5	46 166	119,03	130	11- 1-54	—	173	291	514	—	—	634	16- 1-55	—	—
Plittersdorf	340,2	48 354	106,67	199	4-11-47	—	255	386	607	—	—	723	17- 1-55	—	—
Maxau	362,3	50 343	97,81	255	4-11-47	340	308	429	675	1 220	1921-55 ²⁾	838	17- 1-55	4 350	3,15
Philippsburg	389,3	52 201	90,66	172	4-11-47	—	220	365	657	—	—	871	17- 1-55	—	—
Speyer	400,6	53 235	88,52	152	4- 1-54	—	195	344	648	—	—	867	18- 1-55	—	2,10
Rheinau	415,2	53 905	86,38	117	4-11-47	—	167	330	645	—	—	893	18- 1-55	—	—
Mannheim	424,9	54 136	85,18	100	8-11-49	—	142	298	623	—	—	876	17- 1-55	—	1,50
Worms	443,4	68 936	84,16	27	5-11-47	408	72	220	522	1 400	1936-55	746	17- 1-55	5 600	0,95
Nierstein-Oppenheim . .	480,6	70 462	80,20	95	29- 3-21	370	—	—	—	—	—	728	18- 1-55	—	—
Mayence	498,3	98 488	78,43	110	14- 2-29	—	141	281	550	—	—	733	16- 1-20	~6 800	1,70
Bingen	528,4	99 277	76,18	40	8-11-49	—	151	281	533	1 640	1936-45	733	16- 1-20	~6 800	1,70
Trechtingshausen	535,4	103 435	72,30	33	3-11-47	—	79	193	428	—	—	600	16- 1-20	—	1,00
Kaub	546,2	103 729	67,66	42	3-11-47	—	75	200	465	—	—	720 ³⁾	31- 1-40	—	—
St. Goar	556,4	103 842	63,75	60 ³⁾	3-11-47	482	81	215	536	1 580	1936-55	792	16- 1-20	~7 400	1,05
Boppard	570,5	103 981	61,56	106	16- 2-29	—	155	307	644	—	—	887	16- 1-20	—	1,85
Coblence	591,5	110 075	57,67	—24 ³⁾	3-11-47	—	73	227	571	—	—	834	16- 1-20	—	1,10
				+24	4-11-47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
				6 ³⁾	16- 2-29	—	96	227	616	—	—	930	1- 1-26	—	1,15
				46	3-11-47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Andernach	613,8	139 795	51,47	37 ³⁾	16- 2-29	—	99	266	715	1 950	1936-55	1 043	1- 1-26	11 100	1,30
				56	4-11-47	560	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Linz	629,9	140 943	47,95	—27 ³⁾	16- 2-29	—	69	256	735	—	—	1 098	1- 1-26	—	1,05
				+17	4-11-47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Bonn	654,7	141 162	43,66	—33 ³⁾	16- 2-29	—	40	205	622	—	—	910	1- 1-26	—	0,60
				— 9	4-11-47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cologne	688,0	144 612	35,98	—39 ³⁾	16- 2-29	(465)	30	206	657	2 040	1936-55	969	1- 1-26	11 100	0,55
				—17	4-11-47	530	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Düsseldorf	744,2	148 040	24,48	106	1-11-47	530	150	329	767	2 020	1936-55	1 110	2- 1-26	11 200	1,85
Ruhrort	780,8	153 176	16,13	173	7-11-47	—	220	419	911	—	—	1 300	2- 1-26	—	2,50
Wesel	814,0	154 528	11,25	145	9- 1-54	—	193	403	909	—	—	1 231	3- 1-26	—	2,25
Rees	837,4	159 683	9,73	11	8-11-47	590	60	280	738	219	1936-55	997	3- 1-26	12 200	0,95
Emmerich	851,9	159 784	8,05	89	4-11-47	—	135	336	771	—	—	983	3- 1-26	—	1,70

1) Nouvelle période de référence 1953/56 par suite de la mise en exploitation du canal latéral au Rhin (dérivation d'un débit de l'ordre de 1 080 m³/s.

2) = Sans 1945.

sensation graphique couramment employée pour annoter aussi bien les prévisions que les débits de crue réels, on arrive facilement à reconnaître quels sont les affluents que l'on a négligés au départ, ce qui permet d'en tenir compte dans les prévisions faites par la suite. Ces prévisions de niveau sont déjà devenues très précises, l'erreur ne dépassant que rarement 10 cm.

Pendant les hivers de gel, les Administrations des Eaux et de la Navigation transmettent chaque matin à leurs Directions des rapports détaillés sur les *conditions de gel* dans le fleuve, ceci sur la base des renseignements fournis par les agents stationnés sur les lieux. Les Directions des diverses Administrations échangent alors ces renseignements entre elles et diffusent au public dans la presse quotidienne et par T.S.F. un bref aperçu des conditions de gel et des possibilités de navigation sur le Rhin et ses affluents. Les organismes particulièrement intéressés reçoivent en outre des rapports écrits plus détaillés. Les détails du Service des glaces et des crues sont précisés dans une ordonnance particulière de la signalisation des crues et des glaces.

Une tâche particulièrement difficile du service hydrologique est de déterminer le volume et le type du *transport des matériaux solides dans le*

Rhin. On n'a enregistré jusqu'à présent que des succès assez médiocres dans tous travaux de ce genre effectués, et il n'a surtout pas encore été possible d'obtenir par la méthode acoustique sur le fleuve même des résultats utilisables qui auraient pu fournir des données sur le volume et le parcours du débit solide.

Le *contrôle qualitatif* des eaux du Rhin gagne toujours davantage d'importance, étant donné les densités de population et d'industrialisation des régions riveraines toujours croissantes. Les études chimiques, bactériologiques et biologiques régulièrement effectuées à cette fin montrent nettement à quel point les eaux sont polluées, et permettent d'indiquer aux Administrations des Eaux et de la Navigation quelles sont les conditions qu'elles doivent imposer à ceux qui déversent des eaux d'égout dans le fleuve, afin de protéger la pisciculture et la santé des populations riveraines. A ce sujet, il convient encore de mentionner la plus récente de ces activités, concernant la détection de la contamination radio-active des eaux du fleuve.

Finalement, notons le « Synopsis des hauteurs d'eau caractéristiques des échelles limnimétriques principales et des débits correspondants » annexé à cet article en tant que caractéristique hydrographique.

BIBLIOGRAPHIE

1. BACKWINKEL (P.) und STURZ- (O.) : Das Meszschiff "Walter Türk" der Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Mainz (Le bateau de mesures "Walter Türk" de la Direction des Eaux et de la Navigation, Mayence) *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 1958, n° 4.
2. ESCHWEILER (W.) : Alte und neue Peilmethoden am Rhein (Anciennes et nouvelles méthodes de sondage sur le Rhin), *Die Wasserwirtschaft*, 1951/52, n° 10.
3. ESCHWEILER (W.) : Entwicklung und Bedeutung des Pegelwesens am Rhein (Evolution et importance du système limnimétrique du Rhin), *Die Wasserwirtschaft*, 1951, Sonderheft zur gewässerkundlichen Tagung in Hamburg.
4. ESCHWEILER (W.) : Hydrographie des Rheinstromes (Hydrographie du Rhin) dans : Der Rhein, Ausbau und Verkehr, Verwaltung, "Rhein"-Verlagsgesellschaft, Duisburg, 1951.
5. ESCHWEILER (W.) : Die Wasserspiegel- und Sohlen-senkung am Niederrhein (L'abaissement du plan d'eau et du lit du Rhin-Inférieur). Besondere Mitteilung Nr. 7 zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch. Verlag Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 1952.
6. — Hochwasser- und Eisberichte der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, nicht veröffentlicht (Rapports sur les crues et les gelées, de la "Wasser- und Schifffahrtsverwaltung", non publiés).
7. — Hydrographische Jahrbücher der Schweiz, verschiedene Jahrgänge (Annales hydrographiques de la Suisse, diverses années), Eidgen. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.
8. — Jahrbücher der Gewässerkunde Norddeutschlands (bis 1936) bzw. Jahrbücher für die Gewässerkunde des deutschen Reiches (1937-40) bzw. Deutsche Gewässerkundliche Jahrbücher (Annales hydrographiques de l'Allemagne du Nord — jusqu'en 1936 — et Annales hydrographiques de l'Allemagne — 1937-40 —, et autres Annales allemandes) Reingebiet. Verlag G. Braun, Karlsruhe.
9. KOESTER (H.) : Wasserversorgung und Wasserwirtschaft (Alimentation en eau et économie hydraulique), *Gas- und Wasserfach*, 1958, Nr. 34.
10. MORZIOI (G.) : Rheintalforschung (Etude de la vallée du Rhin), Rhein, Ausbau, Verkehr, "Rhein"-Verlagsgesellschaft, Duisburg, 1951.
11. PICHL (K.) : Die Erosion der Rheinsohle zwischen Karlsruhe und Oppenheim (L'érosion du lit du Rhin entre Karlsruhe et Oppenheim). *Die Wasserwirtschaft*, 1957-1958, Nr. 11 u. 12.
12. — Der Rheinstrom und seine wichtigsten Nebenflüsse (Le Rhin et ses affluents principaux). *Centralbüro für Meteorologie und Hydrographie im Großherzogtum Baden 1889*.
13. — SCHNELL (K.) : Der Abfluss des Rheines am Pegel Andernach (Le débit du Rhin à la station limni-

métrique d'Andernach). *Arbeiten des Landesamtes für Gewässerkunde im Ministerium für Wirtschaft und Verkehr des Landes Nordrhein — Westfalen*, Düsseldorf, 1951.

14. — Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland (Annuaire statistique de la République Fédérale Allemande), Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart.
15. — TUERK (W.) : Wesen und Wirken der Donauversinkung (Nature et influence de l'abaissement du Danube) als Manuskript gedruckt, Karlsruhe, 1932.
16. — Weska Westdeutscher Schifffahrtskalender, versch. Jahrgänge (Weska-Calendrier de navigation pour

l'Allemagne de l'Ouest, diverses années), *Binnenschifffahrtsverlag*, Duisburg-Ruhrort.

17. — WUNDT (W.) : Die mittleren Abflusshöhen und Abflussspenden des Winters, des Sommers und des Jahres in der Bundesrepublik Deutschland (Les hauteurs et les débits moyens, estivaux, hivernaux et annuels dans la République Fédérale d'Allemagne), Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde, Remagen, 1958.
18. — Zentral-Kommission für die Rheinschifffahrt, Strassburg. Jahresberichte, versch. Jahrgänge (Commission Centrale de la Navigation rhénane, Strasbourg, diverses années).

NOTRE FRONTISPICE

JOHANN GOTTFRIED TULLA (1770-1828).

L'initiateur et le principal auteur des travaux de régularisation du Rhin supérieur (de Bâle à Mannheim) est l'ingénieur badois Tulla.

Né en 1770 à Karlsruhe, où son père, originaire d'une famille néerlandaise, était pasteur, Tulla était primitivement destiné à devenir lui-même, selon la tradition, pasteur comme son père. Mais ses dons naturels et l'intérêt qui le poussait vers les mathématiques, particulièrement, décidèrent sa famille à le laisser devenir ingénieur.

Il complète sa formation par un voyage d'études en Hollande et un stage à l'Académie des Mines de Freiberg (Saxe). Ingénieur en chef au Corps des Ponts et Chaussées du grand-duché de Bade, il en deviendra le colonel directeur à la fin de sa vie. Dès le début de sa carrière, il met l'accent sur les questions hydrauliques en faisant exécuter des mesures systématiques sur le Rhin et ses affluents. Il s'occupe également de former un corps d'ingénieurs compétent.

A partir de 1804, il dirige les travaux relatifs aux affluents du Rhin et mûrit ses plans pour la correction du fleuve, et les travaux sont entrepris d'une part entre Strasbourg et Rastatt, et plus au nord, d'autre part, avec l'accord du Palatinat bavarois.

En 1807, Tulla crée à Karlsruhe une école d'ingénieurs qui devient plus tard une école polytechnique organisée sur le modèle de l'Ecole Polytechnique de Paris.

Tulla aurait pu devenir professeur à Heidelberg. Il a préféré faire une carrière d'ingénieur, au cours de laquelle il s'est montré un praticien remarquable, un exécutant de premier ordre et un travailleur infatigable.

Ses écrits ne sont pas nombreux. On ne connaît de lui qu'un mémoire écrit en 1822 et une instruction parue en 1826, où il expose ses idées sur l'hydraulique et donne un aperçu d'ensemble sur les travaux nécessaires à la régularisation du Rhin, ainsi que la manière de calculer la pente optimum à donner au cours du fleuve rectifié.

En somme, la pensée de toute sa vie s'est appliquée à l'étude du Rhin, à sa correction et à sa régularisation.

Tulla se trouve à Paris en 1828 pour y discuter des problèmes du Rhin, lorsqu'il meurt des suites d'une opération. Il repose au cimetière Montmartre. En 1853, à Maxau, près de Karlsruhe, lieu de ses premiers travaux, fut érigé un monument en l'honneur de l'ingénieur Tulla.

JOHANN GOTTFRIED TULLA (1770-1828).

The man who started the training work on the Upper Rhine (from Basle to Mannheim) and who was its main instigator was an engineer from Baden, Johann Tulla.

Tulla was born in 1770 at Karlsruhe and was originally destined for the Protestant ministry like his father whose family was Dutch. But his natural gifts and his interest in mathematics, particularly geometry, made his family decide to let him become an engineer.

A study tour of Holland and a period spent at the Academy of Mines in Freiberg, Saxony, completed his education. He became Chief Engineer of the Public Works Department of the Grand Duchy of Baden and then became Colonel Director of the Department towards the end of his life. Right from the beginning of his career he laid emphasis on hydraulic matters by carrying out systematic measurements on the Rhine and its tributaries. He was also concerned with training a body of competent engineers.

From 1804 onwards, he directed work connected with the tributaries of the Rhine and matured his plans for training work on the latter river. Work on the Rhine started between Strasbourg and Rastatt and further north with the assent of the Palatinate of Bavaria.

In 1807, Tulla founded an engineering school at Karlsruhe which later became a polytechnic modeled on the Ecole Polytechnique at Paris.

Tulla could have become a professor at Heidelberg but he preferred to pursue an engineering career during which he showed himself to be a remarkable practical man, a first rate executive and an indefatigable worker.

His writings are not numerous. We only have a memorandum which he wrote in 1822 and an instruction dated 1826 in which he stated his views on hydraulics and gave a glimpse of all the work that had to be done to train the Rhine as well as the method of determining the best gradient for the bed of the river when it was trained.

To sum up, Tulla's life was concerned with studying the Rhine and with training it.

In 1828, Tulla went to Paris to discuss problems connected with the Rhine and died there. He was buried at the Montmartre Cemetery. A monument was erected to Tulla in 1853 at Maxau, near Karlsruhe, the site of the first work he undertook.