Le Rhin en Hollande

The Dutch Rhine

PAR

J. W. TOPS,

INGÉNIEUR EN CHEF DU « RIJKSWATERSTAAT », CHARGÉ DU SERVICE D'ÉTUDES POUR LE COURS MOYEN DU RHIN

P. J. WEMELSFELDER,

ET

A. VOLKER

INGÉNIEUR EN CHEF DU « RIJKSWATERSTAAT »,
CHARGÉ DE LA SECTION HYDROMÉTRIQUE DU SERVICE GÉNÉRAL.CHEF DU SERVICE POUR L'AMÉNAGEMENT DES EAUX,
DU « RIJKSWATERSTAAT » (1)

Les auteurs ont cherché à mettre en évidence trois aspects du Rhin qui sont d'une importance primordiale pour le pays qu'il traverse. En raison de la situation exceptionnelle des Pays-Bas, qui sont caractérisés par la plus faible altitude moyenne au monde et par la lutte contre l'invasion de l'eau salée, le Rhin présente dans ce pays des aspects bien différents de ceux qu'on rencontre dans les autres pays, en amont. Il s'agit de la lutte contre les crues et les inondations, de l'aménagement du fleuve dans l'intérêt de la navigation, et de l'usage des eaux du Rhin pour couvrir les besoins en eaux douces.

Il est intéressant de noter que, dans l'Histoire, ces trois aspects se sont présentés successivement et que, par conséquent, la domination du fleuve est devenue de plus en plus urgente.

C'est ainsi que la régularisation et la normalisation du fleuve ne furent entrepris d'abord que pour la défense contre les inondations. Plus tard, les intérêts toujours croissants de la navigation entrèrent en jeu : une normalisation plus poussée devint nécessaire, suivie plus tard par la canalisation d'un des bras du Rhin. En outre, à partir de 1900, l'importance du Rhin pour la Hollande se manifesta de plus en plus dans le domaine de l'alimentation en eaux : eaux pour repousser les eaux salées, eaux destinées à l'irrigation supplémentaire des terres, et eaux potables.

In view of the fact that the Netherlands are a country in which the average height of the land is lower than anywhere else in the world and there is a constant threat from the sea, the appearance of the Dutch Rhine is very different from that of the sections upstream of the Netherlands border. The authors discuss the three factors that affect the country most vitally, which are the constant fight against flooding when the river is in spate, improving the river's navigability, and the use of water from the Rhine to meet the demand for fresh water.

It is an interesting fact that three requirements made themselves felt successively down the centuries, so that the necessity of keeping the Rhine in check is now more urgent now than ever before.

Originally, the chief concern was to provide some form of flood protection, but with the development of navigation, means also had to be found to keep a clear passage open for river craft. More extensive river training works were required, which led to the canalisation of one of the arms of the river. And finally, from the turn of the present century onwards, the Rhine became more and more important as a general source of water for the country, supplying the water required to push back salt sea water as well as additional irrigation and drinking water.

I. — INTRODUCTION

Avant de traiter, dans le cadre de cette série d'articles, du Rhin en Hollande, il est bon de donner tout d'abord une idée du caractère de ce fleuve et du pays qu'il traverse.

Le Rhin, qui reçoit l'eau de nombreux affluents en dehors des frontières hollandaises, change de caractère après son entrée en Hollande. Au lieu de recevoir des affluents, il alimente des bras.

(1) Les différentes parties de ce mémoire sont dues :

Le chapitre I : Introduction, à M. TOPS.

Le chapitre II : a) Régime du Rhin en Hollande (débits, crues, charriage des glaces), à M. WEMELSFELDER.

b) Régime du Rhin en Hollande (débit solide, charriage mesuré et calculé), à M. TOPS.

Le chapitre III : Conséquence des crues, à M. TOPS.

Le chapitre IV : Le Rhin et l'aménagement des eaux en Hollande, à M. VOLKER.

Le chapitre V : Navigation : travaux à M. TOPS, trafic à M. WEMELSFELDER.

Cela commence déjà à une dizaine de kilomètres à l'ouest de la frontière, où le Bovenrijn (*) se divise en deux, le Waal et le canal de Panterden. Une dizaine de kilomètres plus loin, le canal de Panterden se divise en IJssel et Nederrijn (**). Le bras nord, l'IJssel, suit un cours souvent très méandreux et débouche dans l'IJsselmeer, l'ancien Zuiderzee; les bras ouest, le Waal et le Nederrijn-Lek, débouchent par un delta dans la mer du Nord. La figure 1 donne un aperçu des cours des bras du Rhin.

Le caractère des régions traversées par le Rhin en Hollande est fortement marqué par le fleuve; en fait, ces régions doivent leur existence au fleuve. La plus grande partie de ces régions consiste en effet en dépôts fluviaux : sable apporté par le fleuve, sur lequel se déposait le limon fertile dans les régions peu soumises au courant. En quelque sorte, la rivière avait alors libre jeu. Suivant le chemin de moindre résistance, de nouvelles boucles se formaient, des vieilles étaient coupées, des berges se créaient et se défaisaient. Ceci jusqu'à ce que l'homme entreprenne la lutte contre le fleuve.

Régularisation.

Cette lutte était tout d'abord purement défensive. Afin de ne pas être engloutis par les hautes eaux de la rivière, on établissait des buttes et des quais, sur lesquels on trouvait une certaine sécurité. De véritables travaux fluviaux furent déjà exécutés par les Romains, creusements de nouveaux cours et de canaux de dérivation. Contre l'excès d'eau, on luttait en construisant des digues. On connaît des règlements de Charlemagne sur la construction et l'entretien des digues et sur le drainage.

Au Moyen Age, les rivières prirent une nouvelle importance en devenant des voies de commerce. En outre des problèmes concernant la défense contre l'eau et l'évacuation des eaux en excès, se posaient alors des problèmes de création de polders.

En général, les rivières se prêtaient assez bien, alors, aux exigences du commerce. Les villes commerçantes situées au bord ou à proximité d'une rivière, exécutaient des travaux pour la garder à proximité ou l'y amener. Dans cette période, qui dura jusqu'au XVII^e siècle, il n'était pas encore question d'amélioration du fleuve dans son ensemble. Suivant le rôle de la rivière, soit voie d'évacuation ou de commerce, soit ennemie menaçant vie et prospérité, des mesures étaient prévues par les intéressés directs. Ces intérêts contraires provoquèrent l'intervention du gouvernement des Provinces, qui devenait de plus

en plus puissant. Ceci devait conduire à une véritable amélioration d'ensemble des rivières.

Divers grands travaux ont été réalisés au cours du XVIII^e siècle, surtout dans les régions de bifurcation du Rhin et de ses bras, d'une grande importance pour la navigation et la répartition des eaux.

Le partage des eaux à la bifurcation du Rhin en Waal et Bas-Rhin, laquelle se trouvait environ à hauteur de la frontière actuelle entre les Pays-Bas et l'Allemagne, s'était modifié au grand avantage du Waal, par suite de l'ensablement de l'embouchure du Bas-Rhin. Le Bas-Rhin et l'IJssel recevaient en conséquence de moins en moins d'eau et la navigation sur ces bras s'en ressentait beaucoup. Le creusement du canal de Panterden apporta une grande amélioration. IJssel et Bas-Rhin reçurent davantage d'eau, et la partie coupée du Bas-Rhin, appelée depuis vieux Rhin, ne remplit plus son rôle d'évacuateur que pendant les crues.

Le même inconvénient qu'à la division susdite se présenta aussi au partage entre Bas-Rhin et IJssel. L'embouchure de l'IJssel était repoussée de plus en plus à l'aval, et s'ensablait fortement. On creusa ici une nouvelle embouchure, ce qui accrut le débit et la navigabilité de l'IJssel. Puis quelques boucles du fleuve furent coupées ou rectifiées.

En même temps se généralisaient la construction et l'entretien des digues. La lutte contre l'eau s'organisait. Le gouvernement en prenait la direction au XIX^e siècle.

Normalisation.

Si les travaux précédemment décrits sont appelés travaux de régularisation, dans la seconde moitié du XIX^e siècle on en vint à la normalisation. La technique des déversoirs latéraux, c'est-à-dire des ruptures artificielles de digues, avait perdu la lutte contre celle de normalisation des lits des rivières.

La normalisation fut tout d'abord exécutée pour permettre une bonne évacuation des eaux et des glaces. Bientôt la navigation, dont l'importance augmentait très rapidement, commença à compter également. Un fleuve, le long duquel l'évacuation des eaux et des glaces était bien assurée, ne pouvait garantir une profondeur de la navigation en étiage. Une normalisation plus poussée des lits mineurs était nécessaire, sous forme de cheneaux moins larges mais plus profonds. Ainsi, le Waal fut normalisé trois fois : en premier lieu amélioration des plus mauvais biefs de la rivière, puis fixation de la largeur moyenne à 310 m sur toute la longueur, enfin réduction de cette largeur à 260 m.

L'importance toujours croissante des voies d'eau comme voies de commerce entraînait, à côté de l'amélioration des rivières, l'amélioration

(*) Bovenrijn = Haut-Rhin.

(**) Nederrijn = Bas-Rhin.

FIG. 1.
Le Rhin
et
ses bras en
Hollande.

et le développement du réseau de canaux. Des avant-ports et des complexes d'écluses furent établis aux points de jonction des canaux et des rivières.

Canalisation.

L'utilisation plus intense des rivières fit apparaître de grandes difficultés pour le transport des matériaux, malgré l'état satisfaisant des possibilités d'évacuation des eaux et des glaces. Parallèlement, une nouvelle conception se fit jour, au sujet des eaux fluviales. Autrefois, le souci principal était d'évacuer les eaux à la mer le plus rapidement possible, et sans calamités; puis il

devint nécessaire d'assurer la meilleure utilisation des eaux avant qu'elles ne se perdent dans la mer. Les besoins en eau douce devenaient de plus en plus grands aux Pays-Bas et ils continuent à le devenir. Eau douce pour l'agriculture et l'élevage, pour l'industrie, pour l'alimentation des grands centres en eau potable et, dernier besoin, mais non le moindre, pour lutter contre l'accroissement de la salure dans l'ouest et le nord du pays. Il va sans dire qu'en outre de la quantité d'eau douce disponible, sa qualité jouait également un grand rôle. Aussi est-il du plus grand intérêt, pour toute la Hollande, d'éviter autant que possible la salure des eaux du Rhin.

Comme conséquence logique, il fallut canaliser un ou plusieurs bras du Rhin pour assurer l'utilisation optimum de ses eaux. Entre temps, on avait commencé la canalisation du Bas-Rhin/Lek. En plus de l'amélioration de la navigation sur le Bas-Rhin et l'IJssel par suite de la canalisation, il devint possible de dériver par l'IJssel une grande partie des eaux du Rhin, celles du canal

de Pannerden, vers l'IJsselmeer, et de fournir ainsi l'eau douce du Rhin au nord et au nord-ouest des Pays-Bas.

La réalisation des travaux d'aménagement de l'embouchure doit créer finalement un bassin d'eau douce analogue, sous forme d'un lac de delta, dans l'ouest du pays.

II. — RÉGIME DU RHIN EN HOLLANDE

Débits.

Le régime du Rhin en Hollande est celui de la fin de son cours inférieur, après qu'il ait reçu tous ses apports.

La figure 2 donne un aperçu de l'ensemble du bassin versant. Les chiffres marqués indiquent, entre deux points successifs, l'importance du bassin versant à l'amont du premier, puis l'apport du Rhin proprement dit jusqu'au point suivant, et enfin le débit des affluents. Le tableau 1 donne la valeur des débits minima, moyens et maxima, en m³/s.

TABLEAU 1

à :	Débit minimum	Débit moyen	Débit maximum
Rheinfelden	270	1 040	4 200
Maxau	310	1 260	4 700
Worms	360	1 480	6 400
Kaub.	450	1 840	9 100
Andernach	540	2 310	12 000
Cologne	550	2 330	12 100
Lobith	600	2 400	12 500

A l'intérieur du territoire néerlandais, on trouve encore 4 000 kilomètres carrés qui alimentent directement l'IJssel. Ceci n'a pas grande importance, évidemment.

Le débit du Rhin en Hollande dépend essentiellement des facteurs suivants :

Un bassin versant de 36 000 km², soit 22 %, est situé en Suisse, et comprend, en majorité, de hautes montagnes. Ceci fournit, d'une part, un

complément aux débits de printemps (sans que ceux-ci dépassent toutefois les débits d'hiver) et, d'autre part, un complément considérable aux débits d'été, grâce auquel le Rhin conserve un débit relativement important pendant la saison sèche.

La figure 3 donne le rapport entre le débit en Suisse et celui du reste du bassin versant.

L'apport suisse est relativement le plus faible en février, soit 25 %, et le plus fort en juillet-août, soit 75 %.

Pour la partie hollandaise du fleuve, il est caractéristique que le régime soit déterminé principalement par le plus gros affluent, la Moselle, avec un bassin versant de 28 000 km², soit 18 % du total — composé de montagnes schisteuses très accidentées et à fort coefficient de ruissellement. Les hautes eaux en Hollande sont déterminées surtout par la Moselle.

Les rapports de débits minimum, moyen et maximum, sont les suivants :

à :	Débit minimum	Débit maximum
Bâle	0,25	3,3 x
Worms	0,25	4,3 x
Andernach, près Lobith	0,25	5,2 x

Dès la frontière néerlandaise, le Rhin coule vers la mer par trois bras, avec la répartition suivante :

Waal	70 %
Bas-Rhin	18 %
IJssel	12 %

Le tableau 2 donne quelques valeurs de débits caractéristiques du Rhin à Lobith, en m³/s (période 1911-1958).

Les nombres placés à côté d'un triangle se rapportent au bassin versant de la vallée du Rhin proprement dite, en km².

FIG. 3. — Contribution, en pour-cent
aux débits mensuels du Rhin à Lobith :
A) Par le bassin versant suisse;
B) Par le bassin versant franco-allemand.

TABLEAU 2

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Débit maximum.....	13 000	9 000	7 200	6 040	5 340	4 760	4 300	4 250	4 900	6 760	10 280	12 600	13 000
Moyenne mensuelle maximum	7 350	6 320	5 120	4 400	3 950	3 600	3 300	3 150	3 280	3 800	4 750	6 240	3 055
Débit moyen.....	2 840	2 720	2 540	2 350	2 130	2 150	2 100	1 890	1 740	1 680	2 000	2 480	2 220
Moyenne mensuelle minimum.	1 250	1 040	960	830	980	990	1 010	820	780	680	750	770	1 099
Débit minimum.....	850	850	840	800	820	910	920	755	715	640	620	710	620
Eau de fonte et souterraine du bassin versant suisse (1)....	300	300	350	480	670	770	770	730	660	530	400	320	520

(1) Sans tenir compte de la précipitation évacuée directement en Suisse.

FIG. 4. — Cours des niveaux à Lobith. MAX = enveloppe des crues.
MOYENS = niveaux moyens mensuels. — MIN = enveloppe des minima absolus mensuels.
Les chiffres sont la dernière partie des millésimes : Ex. 41 = 1941.

On voit clairement que les débits maxima ont lieu en hiver, les minima en automne. La variation totale en hauteur est de 10 m. La variation verticale possible chaque jour de l'année est de 9,5 m en hiver, et encore de 5 m en été. Cette variation minimum, à une date donnée, est donc bien plus grande que la différence moyenne entre été et hiver, que l'on peut fixer à 3 m.

La cote du Rhin à Lobith est 10 m. Elle diminue vers l'ouest, et a une valeur de 6 m à environ 100 km de la côte, au point où les marées et les hautes mers de tempête prennent le dessus.

Débits maximums.

Le régime est caractérisé par la courbe de fréquence de la figure 5.

FIG. 5.
Courbes de fréquences des débits à Lobith, déterminés pour une période de 60 ans.

Contrairement à l'usage, nous avons toujours établi, pour les hauteurs de la rivière et les débits, deux courbes de fréquences simultanées, c'est-à-dire une courbe de fréquence du dépassement d'un certain débit en jours par an (c'est la courbe de gauche de la figure 5), et d'autre part, une courbe de fréquence pour le nombre de pointes (c'est la courbe de droite).

Puisque chaque pointe comprend plusieurs jours, le nombre de jours indiqué par la courbe de gauche est plus grand que le nombre de pointes. Comme le montre la figure, ces courbes sont parallèles.

La distance horizontale est équivalente au facteur 5. Ceci veut dire que la durée moyenne d'une période de dépassement est de 5 jours.

La figure indique le débit maximum qui s'est produit, soit 12 500 m³/s (1926). La fréquence annuelle est de 0,007 pointes, correspondant à une période de retour de 150 ans environ, avec une durée moyenne de dépassement de 5 jours.

On ne parlera pas ici des possibilités d'extrapolation, mais il est évident que des débits plus élevés sont possibles. La valeur de la fréquence d'extrapolation dépend naturellement des vues du directeur fluvial. Dans le cas des régions à défendre coûte que coûte contre les inondations, on peut envisager deux risques : 10 % d'une marée catastrophique dans une période assez courte, 50 ans par exemple, (fréquence $2 \cdot 10^{-3}$), et un risque moyen de 1 %, par exemple, dans une période de 500 ans (fréquence $2 \cdot 10^{-5}$). De toutes façons, le technicien doit pouvoir présenter au directeur une extrapolation justifiée des débits, allant jusqu'à une fréquence annuelle de 10^{-4} à 10^{-5} pointes.

Crues.

La figure 3 indique également le caractère des débits des hautes eaux. Il s'agit ici, non de quan-

tités, mais des hauteurs de crues exprimées en mètres. Les maxima enregistrés jusqu'ici sont les suivants :

- Le maximum total direct a été de 7 m en 13 jours (1948);
- La crue la plus rapide a été de 4,25 m en 4 jours, à Lobith, soit plus d'un mètre par 24 heures.

Il est nécessaire de calculer les possibilités de crues en vue :

- a) Des travaux en cours d'exécution dans le lit des rivières;
- b) D'assurer la sécurité des bestiaux dans les laisses;
- c) Des mesures à prendre pour les briqueteries et autres intérêts, dans le lit d'hiver;
- d) D'organiser à temps la garde des digues et prendre les mesures nécessaires.

Pour la Hollande, les intérêts indiqués dans le paragraphe d) sont les plus importants.

Les probabilités des hauteurs sont établies par les Ponts et Chaussées à l'aide des renseignements reçus des territoires riverains du Rhin. Les possibilités de calcul prévisionnel sont très restreintes, car le bassin versant n'est pas très étendu, et le débit de l'important bassin versant de la Moselle arrive très rapidement à Lobith, soit en 2 jours.

Les probabilités sont calculées à partir des hauteurs observées à 7 stations. Ces hauteurs sont transformées en débits, non celui de la station en question, mais celui qui s'ajoute au Rhin. Pour les détails, voir 1).

Charriage des glaces.

Il y a souvent des glaces sur le Rhin, en Hollande, mais non chaque hiver. Sur les bras hollandais du Rhin, étant donné leurs faibles pentes, leurs laisses très étendues, leurs digues peu élevées, ces glaces forment d'énormes masses, causes de soucis.

Bien qu'il n'y ait plus eu de calamités dans les temps récents, depuis les normalisations des rivières en 1899, et que les montées des eaux

FIG. 6.

Temps de propagation des grandes crues en jours.

causées par les plaques et amas de glace n'aient jamais été graves, la marge de sécurité n'est pas grande.

La présence de glaces est importante également pour la navigation très intense sur le Rhin. Dans l'ensemble, on trouve des glaces flottantes dans 50 % des hivers, et des glaces fixes dans plus de 20 % des hivers, sur les bras hollandais du Rhin. Bien entendu, la navigation est complètement arrêtée par les glaces fixes. Mais

FIG. 7.

Probabilité de la présence des glaces :

- un jour arbitraire au cours de ce même jour,
- au cours de la semaine suivante
- au cours du restant de l'hiver.

l'arrêt dû aux glaces flottantes est aussi pratiquement complet, d'une part, en raison des dangers sur la rivière même, d'autre part, parce que la présence de glaces flottantes s'accompagne toujours de sérieux embarras ou d'arrêts complets de la navigation sur les canaux affluents.

La figure 7 donne une idée des possibilités d'interruption.

La saison des glaces va du 21 novembre au 18 mars. La plus grande possibilité de présence de glaces a lieu dans la seconde moitié de janvier. Cette probabilité est de 25 % pour un jour arbitraire.

La probabilité de présence de glace dans une semaine arbitraire est naturellement plus grande, encore plus dans un mois arbitraire, la plus grande dans un hiver, soit 52 %. Ce dernier chiffre diminue évidemment avec le cours de l'hiver. Le dernier jour de la saison des glaces, la probabilité est réduite à zéro.

Les courbes d'un jour, d'une semaine, d'un mois, et d'un hiver entier, se rejoignent pratiquement dans la période descendante. Ceci parce qu'il ne réapparaît pas de nouvelle période de glaces, après la disparition des glaces le 22 février (voir fig. 8).

Si l'on range les hivers d'après la première date d'apparition des glaces sur la rivière, on obtient la figure 8.

Les hivers à glaces très abondantes sont datés. Le premier jour d'apparition ne tombe pas au hasard pendant la période de glaces. On voit peu de débuts précoces ou tardifs. Le plus souvent, le début se produit pendant la seconde moitié de décembre, ou de janvier. La valeur moyenne tombe au 1^{er} janvier.

Le dernier jour de la saison est le 18 mars. On croirait alors que la fin de la période de glaces ne dépend pas du début. Dans ce cas-là, la fin des hivers serait indiquée par une ligne verticale au 18 mars. Il semble que ce ne soit pas le cas. La figure montre une enveloppe. Si cette enveloppe existait vraiment, cela impliquerait que des hivers commencés tôt finissent tôt également. L'enveloppe coupe la ligne de 45° au 22 février. Ceci veut dire que si, à cette date, il n'y a pas encore eu de glaces, il n'y en aura plus, ce qui est physiquement évident. En effet, en cas d'hivers rudes, les glaces subsistent encore quelques jours après l'atténuation du gel, et même après le dégel. S'il n'y a pas de glaces sur la rivière à cette date, il n'y en aura plus bien avant le 18 mars. La prolongation de la présence de glaces dure au maximum 24 jours.

La figure 8 nous montre que les premières glaces se forment au plus tôt le 18 novembre, et au plus tard le 22 février. Ceci compte aussi pour les périodes de glaces suivantes. Une

deuxième ou troisième période de glaces peut commencer au plus tard le 22 février. Si, au 22 février, il n'y a pas de glace sur le fleuve, il n'y en aura plus.

Une enveloppe telle que celle indiquée implique l'existence d'influences météorologiques concernant l'hiver entier.

La période de glace la plus longue peut se produire si l'hiver commence dans la seconde moitié de décembre, et dure jusqu'à la seconde moitié de février. La durée totale maximum est donc supérieure à 90 jours, soit 3 mois. En fait, on n'a observé dans l'hiver le plus long, 1947, que 62 jours de glace, soit 70 % de cette durée maximum.

Voici enfin les moyennes générales suivantes :

	Nombre d'hivers	Nombre de jours par hiver à glaces
Glaces flottantes plus glaces fixes	50 %	25 jours
Glaces fixes	20 %	22 jours

La côte néerlandaise est soumise à de fortes marées semi-diurnes, dont l'amplitude verticale, aux embouchures du Rhin, atteint presque 2 mètres. Ce mouvement de marée se propage vers l'intérieur du pays, jusqu'à 120 km de la côte. A 70-80 km de la côte il y a une limite importante. A l'est, le courant est toujours dirigé vers la mer, plus fort toutefois à marée basse qu'à marée haute. A l'ouest de cette limite, on trouve alternativement : un courant montant vers l'intérieur, fort et près de la côte pendant 6 heures, faible et durant un quart d'heure seulement près de la limite susdite; et un courant de marée basse, descendant vers la mer, présentant à cette limite un caractère fortement pulsatoire avec un débit variant de zéro à deux fois le débit du fleuve. Sur la côte, ce courant de marée basse ne dure que 6 heures environ.

A cette limite, on a donc toutes les 12, 4 heures, un arrêt total du courant des eaux du fleuve, parce que celles-ci sont pour ainsi dire arrêtées par le courant de marée. Cet arrêt dure généralement 1 à 2 heures entières. Des glaces flottantes descendent la rivière, et ayant à l'origine une densité d'occupation de 0,5, par exemple, auront, bien entendu, sur le cours inférieur plus profond, une densité d'occupation croissante qui atteindra 0,8 ou même 1,0. Pour une rivière com-

FIG. 8. — Présence des glaces sur le Rhin ou le Waal. — Périodes hivernales classées successivement d'après la date du commencement de la présence des glaces. Période 1900-1958.

plètement couverte de glaces flottantes, des changements de marée qui durent 1 ou 2 heures, surtout s'ils ont lieu dans la nuit, provoquent une prise rapide des glaces par gel intense. Ceci se produit simultanément sur une longueur de rivière de 5 à 10 km, pour une largeur de 400 m.

En général, il n'est pas possible, dès le lendemain, de briser entièrement une telle couche de glace. Immédiatement, les glaces flottantes descendantes sont arrêtées par cette couche et l'accroissent rapidement vers l'amont. La vitesse d'accroissement est de l'ordre de 1 km par heure,

et l'épaisseur de la couche atteint normalement 30 cm par suite de l'enchevêtrement des glaçons. Sur les parties de rivière mouvementées, le courant entraîne les glaçons vers l'aval, et il se forme alors, sur des kilomètres de longueur, des couches de glace dont l'épaisseur atteint quelques décimètres, et même un à deux mètres.

L'enchevêtrement des masses de glace, ou le charriage, peuvent créer de lourds « barrages de glace », dont le pied peut atteindre le fond de la rivière, soit une profondeur de 3 à 4 mètres, et dont la tête peut dépasser de 4 mètres le niveau d'eau, soit une épaisseur totale de 8 mètres.

Ces barrages de glace obstruent sérieusement la rivière, et causent de grandes accumulations d'eau à l'amont. Sur les bras hollandais du Rhin, des accumulations de 2 à 3 m de hauteur se produisent régulièrement. Ces accumulations, qui causaient autrefois de graves et nombreuses ruptures de digues et inondations, constituent encore maintenant une menace latente.

La figure 9 indique l'étendue de la couverture de glaces pour les six hivers les plus rudes, avec glaces fixes depuis 1900.

Pendant l'hiver très rude de 1947, la couver-

FIG. 9

Etendue de la couverture des glaces le long du fleuve, pour les hivers les plus rudes.

ture de glaces fixes atteignit presque Manheim. La longueur totale de la couverture de glaces était alors de 220 km.

Bien entendu, on essaie toujours, à l'aide de brise-glaces, d'éviter que les glaces ne se fixent. Si cela se produit cependant, en général lorsque la température descend jusqu'à -10° ou -12° , on casse la couche de glace par tous les moyens possibles. Ceci ne peut se passer, évidemment, que du côté aval de la couche, où les glaces cassées sont évacuées à la mer par le courant. Même avec les meilleurs moyens, la progression est rarement supérieure à 4 km par jour.

De lourds barrages de glace provoquent des retards supplémentaires. La rupture des glaces progresse le plus loin dans un hiver à dégel tardif. Ainsi, en 1947, les brise-glaces ont atteint Xanten, après avoir brisé la couverture de glace sur 150 km de longueur de rivière. Au total, il y avait sur ce trajet un maximum de 13 brise-glaces, occupés à ouvrir les glaces, à casser les glaçons arrivant, à régler les bords, et à éviter que les quantités de glaces flottantes formées ne se fixent à nouveau.

Par suite de la fermeture des embouchures (plan Delta) le libre écoulement des glaces vers la mer ne sera plus possible. Ceci pose de graves problèmes, pour la solution desquels on a commencé une importante étude préliminaire.

Débit solide.

Au cours de notre siècle, il est apparu que les matériaux solides transportés par la rivière jouaient souvent un rôle décisif dans le comportement de la rivière. Le problème des laisses, qui s'élevaient de plus en plus le long de la rivière, était connu depuis longtemps. Heureusement, les briqueteries pouvaient transformer en briques les apports argileux, ce qui laissait l'avantage, pour les rivières, de maintenir à peu près constante l'altitude des laisses. On connaissait également depuis longtemps le danger d'envasement, et notamment pour les ports; aussi avait-on étudié, à la fin du siècle dernier, le transport de boues par la rivière.

La question du transport des sables était différente. Le fait que la rivière transportait du sable était considéré d'une part comme un inconvénient inévitable, d'autre part on en profitait. Là où se créaient des bancs peu profonds, on essayait de les enlever, si possible; la demande toujours croissante de sables de rivière, pendant les dernières décennies, créait une nouvelle industrie, celle du dragage de sable dans les rivières. Comme ceci se passait au début sans aucune organisation, il n'est pas étonnant, après coup, que ces dragages, à côté des autres normalisations, aient entraîné en général un abaissement du lit des rivières, inacceptable dans certains cas.

Avec l'abaissement du fond des rivières, la

cote du plan d'eau baissait aussi. Par suite, les seuils des écluses limitant les canaux du côté de la rivière se trouvaient trop élevés par rapport au niveau d'eau rabaissé. La navigation en éprouvait, en période sèche, de graves ennuis. En outre, la sécurité d'emplacement des travaux sur les berges n'était plus assurée et, finalement, par suite d'une telle perturbation du lit de la rivière, les relèvements locaux des fonds déterminaient, encore plus étroitement qu'avant, le tirant d'eau pour la navigation sur un certain trajet.

A côté des problèmes observables, en rapport avec le transport du sable, il y eut aussi des questions relatives au comportement du sol après réalisation d'améliorations de rivières.

Ceci entraîna vers 1939 deux conséquences : premièrement, on mit fin au dragage libre sur les rivières (par la création de concessions de dragage), secondement on coordonna les études de transport de sable.

Pour déterminer le transport de sable dans le Rhin et ses bras, on mit au point tout d'abord des appareils de mesure. Actuellement, les mesures sont effectuées à l'aide de trois appareils, soit :

le B.T.M.A., le D.F.1 et le D.F.2.

A l'aide du B.T.M.A. (appareil Arnhem de mesure du transport de fonds), on détermine la part du transport qui a lieu sur le fond jusqu'à une hauteur de 10 cm.

A l'aide du D.F.2 (Bouteille de Delft sur patins), on mesure la part du transport de sable qui a lieu entre deux plans situés 10 cm et 50 cm au-dessus du fond.

Avec le D.F.1 (Bouteille de Delft à fil), enfin, on détermine la part restante du transport, soit entre le plan sis à 0,50 m du fond, et la surface.

A partir des résultats de très nombreuses mesures faites en plusieurs stations sur le Rhin et ses bras, il a été possible de trouver une relation entre le débit des eaux et le transport de sable.

Pour établir un pronostic en fonction des changements de conditions résultant des travaux d'amélioration des rivières prévus, il était nécessaire de disposer, à côté d'une relation déterminée empiriquement, d'une formule en accord avec les observations. On pensait, pour cela, aux formules de Du Boys/Straub, Schoklitsch, Einstein et Meyer-Peter/Müller. Aussi bien avec la formule d'Einstein qu'avec celle de Meyer-Peter/Müller, on trouvait un accord convenable avec les résultats des mesures; après de nombreux calculs d'essais, on donna la préférence à la dernière formule, utilisée de la façon suivante sur les bras hollandais du Rhin :

$$z_s = \frac{b_s}{15,1} (\mu h I - 7,9 d_t)^{3/2}$$

dans laquelle :

z_s = charriage du sable en $m^3/24 h$;

b_s = largeur sur laquelle a lieu le charriage, en m;

h = profondeur d'eau moyenne du lit d'été, en m;

I = pente de la surface de l'eau, en cm/km;

d_t = diamètre significatif du gain du matériau transporté, en mm;

μ = facteur de rugosité, établi ainsi :

$$\mu = \left(\frac{C}{18 \log 12 h/d_b} \right)^{3/2}$$

où :

C = coefficient de Chézy en $m^{1/2}/s$;

d_b = diamètre du grain du matériau de sol transporté significatif pour le frottement, en m.

Il faut remarquer que, d'après les conceptions actuelles, seule est calculable la part de transport du sable lié directement au fond; ce transport est appelé charriage d'entraînement (friction load). Le matériau transporté en quasi suspension n'est pas calculable par cette formule; ce mode de transport est appelé saltation (wash-load). A l'aide de ce calcul, on pouvait évaluer la capacité de charriage de sable de différents bras, sur différents profils en travers. La figure 10 donne un aperçu de cette capacité le long du Waal.

Des calculs semblables ont été faits lors des études de maintien de la cote de fond dans les coupures des boucles réalisées ou en projet, et surtout pour évaluer la cote de fond désirable après l'exécution de la canalisation du Bas-Rhin-Lek [3].

La figure 11 donne une idée de l'accord des résultats des mesures et des calculs.

Charriage mesuré et calculé.

Pour avoir une idée de l'entraînement du sable dans les rivières, une troisième méthode, à côté de celles de mesures et de calculs, est celle des essais sur modèles réduits. Dans le Laboratoire d'Hydraulique de Delft, et dans la station d'essais en plein air du Polder Nord-Est, on a construit d'importants modèles dans lesquels a été imité le phénomène de transport des matériaux. Des recherches approfondies sur modèles ont été effectuées pour les confluent, pour la région de l'embouchure de l'IJssel, pour plusieurs avant-ports, pour des canaux débouchant en rivières et, pendant les dernières années, pour les travaux de canalisation de Nederrijn-Lek. Pour cela sont associés essais sur modèles réduits, calculs et mesures.

Afin d'obtenir une image continue de l'en-

FIG. 10.

trainement du sable dans les bras néerlandais du Rhin, on établit annuellement un « bilan de sable ». A l'aide de profils en travers établis pendant les mois d'été pour tous les bras, on calcule la cote moyenne du fond entre les lignes nominales d'été. Après comparaison avec les profils de l'année précédente, on trouve les quantités de sables apportées ou enlevées sur diffé-

FIG. 11. — Chariage mesuré et calculé.

rents trajets. D'autre part, on sait où et en quelle quantité du sable a été enlevé par dragage. Enfin, les capacités d'entraînement de sable, en amont et en aval du trajet, ont été calculées pour les différents cas.

A l'aide de ces données, on peut établir un bilan. Pendant les recherches effectuées au cours de l'établissement de ce bilan, il est apparu entre autres que les charriages et les bancs con-

vexes des boucles peuvent accumuler de grandes quantités de sable. Dans certains cas, ils gagnent du sable, mais dans d'autres cas, ils en perdent. Il est évident que pendant les hautes eaux, on perd du sable du lit mineur accumulé ensuite sur les laisses.

Ci-dessous sont indiqués quelques entraînements annuels mesurés et calculés sur les bras hollandais du Rhin :

TABLEAU 3

Genre de transport	Bovenrijn	Waal	Canal de Pannerden		Bas-Rhin	IJssel
			sup.	inf.		
ANNÉE HUMIDE (1926)						
Total..... (mesuré).	700	510	>170	<175	145	50
Charriage d'entraînemt . (calculé).	330	250	120	95	105	45
Saltation..... (calculée).	370	260	50	80	40	5
ANNÉE MOYENNE (1901-1950)						
Total..... (mesuré).	390	285	100	110	100	>30
Charriage d'entraînemt . (calculé).	195	165	70	65	75	<30
Saltation..... (calculée).	195	120	30	45	25	> 0
ANNÉE MAJEURE (1949)						
Total..... (mesuré).	65	55	25	20	20	5
Charriage d'entraînemt . (calculé).	25	40	5	5	30	15
Saltation..... (calculée).	40	15	20	15	— 10	— 10

Les chiffres pour la saltation ont été trouvés en déduisant le charriage calculé du transport total.

En général, le problème du transport de sable

sur les rivières est un problème de lutte contre un excès de sable. Sur le bras hollandais du Rhin, toutefois, il s'agit plutôt de prévenir les conséquences inacceptables d'un manque local de sable.

III. — CONSÉQUENCE DES CRUES

Les Pays-Bas sont continuellement assiégés par l'eau, du fait de leur situation dans la région des deltas du Rhin, de la Meuse et de l'Escaut. Une grande partie de l'ouest des Pays-Bas se trouve au-dessous du niveau de la mer, et de grandes bandes de terre le long des rivières sont soumises au danger d'inondation lors des hautes eaux. La figure 12 donne une image des parties des Pays-Bas qui peuvent être inondées à la suite de rupture de digues.

La catastrophe de 1953, à la suite de la rupture des digues de mer, reste présente à la mémoire de nombreuses personnes. Pour les derniè-

res ruptures des digues du Rhin et de ses bras, il faut remonter jusqu'à 1926.

En général, on trouve en Hollande trois modes de protection des terres endiguées, contre les inondations :

1. Evacuation latérale et locale des eaux par les déversoirs.
2. Construction des digues suffisamment hautes et solides.
3. Amélioration de la capacité de débit de la rivière pour les hautes eaux (normalisation du lit majeur).

FIG. 12.

Déversoirs.

Dans ce système, une partie du débit de pointe se déverse par une échancrure d'une digue, dans un bassin d'accumulation. En conséquence, le débit de la rivière à l'aval du déversoir est inférieur à celui de l'amont. Cette méthode n'est plus appliquée en Hollande le long du bras du Rhin.

Par contre, on se sert du système de la « rivière verte ». Là où la capacité de débit de la rivière est estimée insuffisante, on peut réaliser une amélioration en donnant aux bandes de terre appartenant au lit majeur un débit supérieur par égalisation, au besoin approfondissement et élimination des obstacles qui freinent le courant, sous forme de végétation... Si de telles bandes de terrains ont un profil latéral régulier et sont éventuellement pourvues de digues fusibles ou non, à la jonction avec le lit mineur, on parle d'une rivière verte. On obtient ainsi un abaissement du plan d'eau au droit de la rivière verte et sur une certaine distance à l'amont.

Endiguements.

Certains endiguements le long des bras hollandais du Rhin ont été construits totalement en argile, d'autres possèdent un noyau de sable revêtu d'argile. Entre le lit mineur de la rivière, normalisé au moyen de clayonnage et d'épis, et les digues, se trouvent les laisses. En général, celles-ci sont protégées contre les hautes eaux d'été au moyen de « digues d'été ». La figure 13 en donne une idée.

FIG. 13.

Afin de remplir convenablement leur fonction, les digues doivent être suffisamment solides et élevées. Le profil, le revêtement et la protection doivent être tels qu'on n'ait pas à craindre de déplacement du corps de la digue, endommagement du talus extérieur ou ramollissement du talus intérieur; à l'aide de l'expérience acquise et d'essais, il est possible de déterminer un profil assez solide.

Le choix de la hauteur de la digue est d'un autre domaine. Pour cela, une question se pose : quel niveau de l'eau doit-il être considéré comme critique? Autrefois, on se basait sur le plus haut niveau d'eau antérieurement connu. En calculant

la hauteur du sommet de la digue, on ajoutait par sécurité une certaine marge à ce niveau. Cette marge de sécurité est de 1 m pour le Rhin supérieur, le Waal, le canal Pannerden, et le Bas-Rhin; elle est de 0,50 m pour l'IJssel.

L'application de cette marge de sécurité offre l'inconvénient que la sécurité n'est pas la même partout. Dans deux parties rapprochées de la rivière, l'une étroite, l'autre large, la même marge de sécurité dans la partie étroite donnera une sécurité moindre que dans la partie large. Une augmentation donnée du débit entraînera en effet dans la partie étroite un plus fort exhaussement du plan d'eau. Egalement, une même marge de sécurité dans une section de rivière plus proche de l'embouchure, où la pente est plus faible, procurera une plus grande sécurité que dans une section plus en amont, à pente plus forte. Pour ces raisons, on étudie maintenant quelle fréquence on doit considérer comme critique pour le débit que doit permettre la digue. Lorsque ce débit est déterminé, on doit calculer les niveaux d'eau pouvant se produire le long des digues. Ces niveaux d'eau, auxquels on ajoute simplement une marge tenant compte de l'influence du vent et des vagues, donnent les hauteurs de pointes cherchées.

Normalisation du lit majeur.

La normalisation du lit mineur, au moyen d'aménagements guidant le courant, est effectuée surtout dans l'intérêt de la navigation. Pour assurer un écoulement satisfaisant des eaux et des glaces, cependant, il est nécessaire de normaliser aussi le lit majeur. En effet, pendant les hautes eaux, une grande partie du flot doit passer par les laisses. Des quais d'été trop élevés, des usines, des routes élevées, des grillages, des haies et des arbres peuvent constituer une résistance telle que le niveau d'eau est relevé d'une façon inacceptable. Il faut donc éviter qu'apparaissent, dans le lit majeur du Rhin, de tels obstacles relevant le niveau d'eau, sans une compensation complète sous forme d'agrandissement du lit.

Il existe cependant un facteur naturel qui diminue la capacité de débit du lit majeur, l'ensablement et l'envasement des laisses. Bien que la teneur en argile du Rhin, qui varie de 20 à 400 mg/l, soit inférieure à celle de beaucoup d'autres fleuves, il est possible de rencontrer localement des apports pouvant atteindre 1 m d'épaisseur en 30 ans. Heureusement cette argile est réemployée en grande partie par les briqueteries. Mais, évidemment, il n'en est pas ainsi partout, ni de manière régulière.

Afin de prévenir les relèvements du plan d'eau, il faudra vérifier que la capacité de débit des lits majeurs ne diminue pas par rapport à l'état actuel.

IV. — LE RHIN ET L'AMÉNAGEMENT DES EAUX EN HOLLANDE

Les sources d'alimentation en eaux douces.

Du point de vue de l'alimentation en eaux douces, la Hollande, à première vue, paraît être un pays bien privilégié. L'abondance relative des précipitations (730 mm par an) et surtout la répartition quasi-uniforme de la pluie au cours de l'année lui assurent un apport important et constant d'eaux douces. En plus, le pays se trouve dans l'heureuse situation de recevoir dans son territoire les débits de plusieurs fleuves tels que le Rhin, la Meuse et l'Escaut, dont l'ensemble des bassins de déversement dépasse considérablement la surface du pays. C'est surtout le Rhin qui ajoute au bilan d'eau du pays le plus grand apport. L'on trouve en effet les volumes suivants (en millions de m³ par an) pour les sources les plus importantes :

Apport par le Rhin.....	70 000
Apport par la Meuse.....	8 000
Apport par les petits cours d'eau	1 500
Apport par les précipitations....	27 000

Au total 106 500

C'est donc le Rhin qui contribue pour environ 60 % au total des apports. L'Escaut, qui se jette dès son entrée dans le pays dans un grand estuaire, ne peut jouer un rôle de quelque intérêt.

Du fait de la basse altitude de la Hollande, l'évacuation des eaux superflues et la protection du pays contre les grandes crues du Rhin ont toujours été considérées comme facteurs primaires de la sauvegarde du pays.

Il paraît donc incompréhensible qu'un pays avec de telles conditions hydrologiques se trouve actuellement en face du problème de la pénurie d'eaux douces, problème plutôt concevable pour les pays arides. Un examen de la situation hydrographique de la Hollande fera ressortir pourquoi, dans ce pays de « polders », créés par l'homme, ce problème s'est présenté, et quel rôle le Rhin devra jouer dans le projet de l'aménagement des eaux. Pour la réalisation de ce projet, de grands travaux hydrauliques tels que les travaux du Zuiderzee, les travaux du Delta et la canalisation du Nederrijn sont actuellement en cours d'exécution.

Conséquence d'un milieu artificiel.

La Hollande fournit un exemple typique d'un milieu artificiel. Sans les digues le long de la mer et des fleuves, plus de la moitié de la surface serait exposée aux inondations (fig. 12). Il y a même un quart du pays qui se trouve en dessous du niveau moyen de la mer. Au risque de voir son pays englouti, le Hollandais se trouve donc dans l'obligation permanente de lutter contre l'invasion toujours menaçante des eaux, d'autant plus qu'il n'a cessé de conquérir sur elles de nouveaux

terrains en asséchant de nouveaux polders. Ces gains sont situés parfois à 5 ou 6 mètres au-dessous du niveau moyen de la mer.

Il est évident que, de tout temps, la protection du pays contre l'assaut direct des eaux contre les remparts et l'évacuation des eaux des terrains situés en contrebas des fleuves et des estuaires, ont été les problèmes centraux de la technique hydraulique. Mais, de bonne heure, on s'est aperçu aussi que la création d'un milieu artificiel tel que celui des polders entraîne encore d'autres conséquences hydrologiques. Déjà, en 1667, Hendric Stevin avait attiré l'attention sur le fait qu'une protection efficace contre les grandes marées n'empêcherait nullement les eaux de mer de s'infiltrer à travers les lignes de défense et de donner lieu à une salinité élevée des eaux dans les canaux et les fossés; Stevin considérait les écluses à sas entre la mer et les grands canaux comme les grandes sources de sel et en soulignant l'importance de « la lutte contre le poison de la mer », il se rendait compte des conséquences néfastes pour l'agriculture des infiltrations d'eau salée. A part des mesures préventives à prendre à l'emplacement des écluses (refoulement des eaux salées dans la chambre vers la mer), Stevin recommandait des mesures curatives dont nous parlerons plus loin.

Aujourd'hui, l'analyse des « sources de sel » a été faite; elle nous montre qu'il existe même plusieurs sources de sel, qui apportent pour ainsi dire continuellement une quantité considérable de chlorures.

C'est en effet l'entrée d'eau de mer par les écluses qui constitue un des plus grands apports. Le pays ne peut se passer d'un certain nombre d'écluses de mer pour l'entrée de la navigation maritime et, partout où l'on trouve ces écluses, les eaux dans les canaux de l'intérieur présentent une salinité très élevée. L'exemple le plus typique est le Noordzeekanaal (Canal de la Mer du Nord) entre le port d'Amsterdam et les grandes écluses d'IJmuiden.

C'est la différence entre les densités de l'eau douce et de l'eau de mer qui produit l'entrée de l'eau de mer dans la chambre de l'écluse pendant l'opération de l'éclusage; cette même différence donne lieu à la pénétration d'eau salée par l'embouchure des fleuves. Poussée par le flux, l'eau de mer remonte le cours des fleuves sous forme d'une langue d'eau salée dont la pointe est au fond du fleuve. A cause de cette langue d'eau salée, l'eau des fleuves ne peut pas être utilisée sans autre précaution à l'irrigation dans la zone des embouchures. Les exigences modernes, qui imposent que les estuaires et les ports soient constamment approfondis pour recevoir des bateaux d'un tonnage toujours plus élevé, ont pour conséquence l'entrée

FIG. 14. — Charge des eaux du Rhin en chlorures à Rees-Lobith (1875-1956).

dans les fleuves d'une quantité croissante d'eau salée. La quantité d'eau douce fluviale, qui serait nécessaire à repousser cette eau salée, n'a pas augmenté : aussi la langue d'eau salée remonte-t-elle de plus en plus vers l'amont. Ce fait s'est produit dans le Nieuwe Waterweg (estuaire du Rhin et de Meuse de Rotterdam à la mer).

La troisième source de sel est la plus difficile à combattre; elle résulte de la présence, dans le sous-sol du pays, d'eaux souterraines d'une grande salinité. Ces eaux sont présentes dans les couches perméables de sables pléistocènes qui s'étendent parfois jusqu'à une profondeur de 250 mètres. Leur grande salinité s'explique par les transgressions marines intervenues au cours de la sédimentation des couches perméables (« eaux de mers fossiles »). Or, par suite de la différence des niveaux, il se produit une infiltration d'eau des polders, dans laquelle l'eau traverse latéralement les couches perméables pour remonter ensuite verticalement au niveau des polders et apparaître dans les fossés et canaux. Ainsi, il y a toujours une montée d'eau salée dans les polders. Un phénomène analogue se présente dans la zone côtière le long des dunes où

l'eau de mer passe par les dunes au-dessous de la lentille d'eau douce.

La quatrième source de sel est peut-être la moins attendue, mais assurément la plus importante; c'est le Rhin, dont les eaux charrient les sels contenus dans les déchets des industries charbonnière et potassique. La figure 14 exprime l'augmentation angoissante de la « charge » du Rhin en ions-chlore enregistrée journalièrement depuis des années. Actuellement, lors des faibles débits, les eaux du Rhin présentent une teneur en ions-chlore de plus de 350 mg par litre, teneur qui dépasse considérablement la limite tolérable observée pour l'emploi comme eau potable.

La pénurie d'eaux douces.

De tous temps, l'on s'est efforcé de combattre l'entrée des eaux salées à l'intérieur du pays. Des mesures préventives n'étant possibles que dans une certaine mesure, l'on a eu recours à des mesures curatives pour faire face aux conséquences de la pénétration de l'eau de mer. Parmi celles-ci le rinçage des canaux et des fossés en été s'est avérée la meilleure. Le système consiste à faire entrer des eaux douces

dans les cours d'eau et à évacuer par des écluses ou par des stations de pompage le trop-plein d'eau vers la mer, tandis qu'on arrive à satisfaire au besoin d'eau pour les cultures.

La nécessité d'un tel procédé se démontre par la salure des eaux de surface telle qu'on la trouve actuellement, salure qui, en dépit de toutes les mesures prises, reste toujours alarmante. Ainsi, l'on observe régulièrement des teneurs en ions-chlore qui dépassent les 1 000 mg par litre; il est rare de trouver des régions où les eaux de surface présentent une salinité inférieure à 300 mg par litre. Dans la Zélande, la salinité dépasse un peu partout les 5 000 mg par litre.

Si l'on examine les exigences auxquelles la qualité des eaux destinées à des emplois divers doit répondre, on peut aisément concevoir les conséquences fâcheuses que cette haute teneur en chlorures ne cesse d'entraîner. Ainsi, pour l'arrosage et l'irrigation en horticulture (cultures de serre), l'eau ne devrait pas contenir plus de 300 mg d'ions-chlore; une concentration de plus de 150 mg par litre fait déjà baisser dans certains cas le rendement. En ce qui concerne la floriculture, on fait tout le possible dans la grande région de culture d'Aalsmeer (au sud d'Amsterdam) pour maintenir un maximum de 150 mg par litre, vu que les fleurs sont très sensibles à une chloruration des eaux d'arrosage.

Il se pose donc le problème de la pénurie d'eaux douces, problème d'autant plus ardu que les volumes d'eau nécessaires pour le rinçage dépassent largement les débits minima du Rhin et de la Meuse et que le Rhin lui-même n'apporte plus des eaux complètement douces.

Rien que pour refouler les eaux saumâtres, il faut au moins entre 1 000 et 1 500 m³ par seconde. Or, le débit moyen du Rhin à la frontière germano-hollandaise est en été de 1 830 m³ par seconde, mais durant les périodes de sécheresse de 1947 et 1949, il n'était que de 600 m³ par seconde.

Il existe encore un autre besoin d'eaux douces. Pour remédier à la pénurie de terres arables aux Pays-Bas, on a examiné les possibilités d'une amélioration du rendement des terres sablonneuses sensibles à la sécheresse dans le sud et l'est du pays. C'est surtout le facteur eau qui intervient dans ce problème et des essais à grande échelle ont démontré qu'il est possible de pousser plus avant les possibilités naturelles du territoire par immigration souterraine (infiltration) ou par arrosage. Pour satisfaire ce besoin, il faudra encore quelques centaines de m³ par seconde d'eaux douces durant les périodes de sécheresse.

Il est donc évident que malgré l'abondance apparente des apports d'eau en Hollande, il reste à résoudre de quelle façon on peut arriver à une

utilisation efficace des ressources en eau disponibles et à quelles exigences, en ce qui concerne la qualité de l'eau, la source principale — le Rhin — doit répondre pour que l'aménagement à installer réponde à ses buts.

Aménagement des eaux.

La construction de grands réservoirs constitue le moyen classique pour suppléer le manque d'eau en été. Ce même moyen est aussi à la base du projet d'aménagement des eaux en Hollande. Puisque la situation topographique du pays ne permet pas l'aménagement de bassins de retenue dans les parties du pays situées au-dessus du niveau moyen de la mer, la seule possibilité de créer des réservoirs se trouve dans le passage de golfes et d'estuaires.

Par la fermeture du Zuiderzee, on a déjà obtenu un tel réservoir : le golfe a été transformé en un bassin d'eau douce qui sera seulement partiellement endigué; il restera un lac, le lac d'IJssel, de 1 200 km², après l'achèvement de tous les travaux de polderisation. Dans le régime d'eau douce de ce bassin, le débit de l'IJssel — un bras du Rhin — représente environ 50 % de tous les apports d'eaux douces.

Un autre grand réservoir de 520 km² sera créé par la fermeture de bras de mer dans le delta entre les îles de la Zélande et de la Hollande méridionale. Ce réservoir sera alimenté principalement par les eaux du Rhin. Quelques autres bassins plus petits ont été réalisés récemment, toujours dans les estuaires.

Les travaux de la canalisation du « Nederrijn » fourniront le moyen d'envoyer selon les besoins une partie importante du débit du Rhin, soit vers le lac d'IJssel, soit vers les bassins dans le delta.

Le régime des eaux de ces réservoirs diffère tout à fait du régime des bassins en montagne. Servant à la fois comme réservoirs d'eau destinée à l'irrigation et au rinçage et comme grands bassins de déversement des régions basses limitrophes, le marnage des niveaux d'été et d'hiver doit être assez limité : sans cela le drainage des régions limitrophes serait sérieusement encombré.

Par leur situation au centre de la région des polders, les réservoirs reçoivent le trop-plein des eaux intérieures et par conséquent une certaine quantité de chlorures en provenance du sous-sol. De plus, les sels entrés par les écluses et les fuites y ajoutent aussi leurs apports. Enfin il faut tenir compte des chlorures dans les eaux du Rhin, la source principale d'alimentation en eaux.

Ainsi, pour le lac d'IJssel, les apports de chlorures par le Rhin sont responsables pour à peu près 50 % des teneurs en ions-chlore qui se présentent au cours de l'année. Il en résulte que non

seulement la quantité, mais aussi la qualité des eaux du Rhin joue un rôle extrêmement important dans le système de l'aménagement des eaux.

Par l'analyse d'observations hydrologiques très étendues, on connaît assez exactement les apports de sel en provenance des diverses sources. Aussi a-t-on pu élaborer des bilans d'eau et des bilans de sel qui démontrent, entre autres, les exigences auxquelles doit répondre la qualité des eaux de rinçage d'un volume donné pour arriver à une certaine limite de chloruration des eaux dans les polders. Il est possible aussi d'évaluer l'influence d'un certain changement de débit du Rhin en chlorures sur la qualité des eaux dans

les réservoirs et par conséquent dans les polders.

De tous ces calculs, ressort une conclusion très importante : c'est que le débit actuel du Rhin en chlorures dépasse considérablement le débit tolérable en vue de l'utilisation des eaux de ce fleuve. Sans une limitation de ce débit, les grands travaux pour l'aménagement des eaux en Hollande — travaux entrepris pour la lutte contre le poison de la mer et pour l'alimentation en eaux douces du pays — perdront, du moins en grande partie, leur valeur. Nous espérons que dans cette lutte « une attaque dans le dos » ne viendra pas nous priver de l'arme la plus essentielle : l'eau vraiment douce du Rhin.

V. — NAVIGATION

Travaux dans l'intérêt de la navigation. — La canalisation du Nederrijn-Lek.

La canalisation du Bas-Rhin et du Lek, en cours d'exécution [5], a un double but :

- Amélioration des conditions hydrauliques du nord des Pays-Bas;
- Amélioration de la navigation de l'IJssel, du canal de Pannderden, du Nederrijn-Lek.

On approfondira ci-après ce deuxième aspect.

Bien que, de loin, la plus grande partie de la navigation internationale sur le Rhin ait lieu par le Bovenrijn et le Waal, le canal de Pannderden, le Nederrijn-Lek et l'IJssel sont d'une très grande importance pour le commerce intérieur. La profondeur de navigation sur ces dernières rivières est bien inférieure à celle du Bovenrijn et du Waal. Lors des débits O.L.R. — débits qui, dans la période 1906-1930, n'ont pas été atteints pendant 20 jours sans glace en moyenne par an —, la profondeur pour la navigation sur le Waal est de 2,50 m à 2,60 m; sur le Nederrijn : 1,20 à 1,40 m; sur l'IJssel : 1,30 m à 1,50 m. Ces profondeurs sur le Nederrijn et l'IJssel sont bien inférieures à celles sur les importants canaux intérieurs qui débouchent dans ces rivières.

Tout d'abord, on a pensé à canaliser l'IJssel. De cette façon, on aurait pu améliorer la profondeur navigable sur le Nederrijn aussi bien que sur l'IJssel; ce projet a été abandonné, cependant, en faveur de l'alimentation de l'IJsselmeer en eau douce et on est passé à la canalisation du Nederrijn.

Par la canalisation du Nederrijn-Lek, on évite, lors des faibles débits, l'écoulement libre de l'eau par le Nederrijn vers l'ouest, et la plus grande partie de l'eau apportée par le canal de Pannderden coule par l'IJssel vers l'IJsselmeer. Par suite, les débits les plus faibles de l'IJssel sont considérablement augmentés, ce qui entraîne un grand avantage pour la navigation. Sur le Bas-Rhin et le Lek aménagés, il reste également, pour les

débits les plus faibles, une profondeur navigable suffisante.

Sur la figure 1, on voit comment sera exécutée la canalisation. Au moyen de trois barrages, accompagnés d'écluses pour la navigation, la rivière sera partagée en quatre sections.

Le barrage amont doit permettre de fixer le plan d'eau, au confluent du Nederrijn et de l'IJssel, pendant les périodes de faibles débits, à une hauteur telle que l'eau apportée par le canal de Pannderden s'écoule par l'IJssel, à l'exception d'un certain débit minimum passant par le Nederrijn (50 m³/s). Dès que le débit du canal de Pannderden devient supérieur à la somme du débit sur l'IJssel nécessaire pour la navigation (et le contrôle des eaux) et du débit minimum susdit de 50 m³/s, on règle le barrage amont de telle façon que l'IJssel conserve son débit indispensable, et que le reste du débit du canal de Pannderden s'écoule par le Nederrijn. Au moment où les débits du canal de Pannderden sont tels que l'IJssel reçoit son débit nécessaire, et que le Nederrijn peut couler librement, le barrage amont est ouvert entièrement. Le débit désiré sur l'IJssel pendant la période de barrage dépendra naturellement des besoins et des possibilités.

Le barrage du milieu doit assurer, pour la section en amont jusqu'au barrage supérieur, une profondeur suffisante pour la navigation.

Le barrage inférieur a d'abord la même fonction que le barrage du milieu. Mais il a également une deuxième tâche. On a, en effet, l'intention de faire écouler, si nécessaire et si possible, l'eau du Waal vers le Lek par la section Betuwe du canal Amsterdam-Rhin, entre Tiel et Wijk-Dij-Duurstede pour les faibles débits du canal de Pannderden. Dans ces conditions, l'écluse du canal Amsterdam-Rhin sera ensuite du côté du Lek à Wijk-Dij-Duurstede. Le barrage inférieur devra être réglé de telle façon que le niveau d'eau de l'écluse à Tiel, côté canal, suive le niveau du Waal — en tenant compte de la pente nécessaire. Il faut noter ici que, même si aucun

passage d'eau n'a lieu par les aqueducs de l'écluse à Tiel, on doit maintenir une certaine dénivellation, car les portes busquées de l'écluse ne s'ouvrent que vers le Waal. La figure 15 donne un aperçu de l'amélioration escomptée

FIG. 15. — Tirant d'eau des bras du Rhin avant et après la canalisation du Nederrijn-Lek.

de la navigabilité du Bas-Rhin et de l'IJssel, par suite de la canalisation.

Pendant les 90 % d'une année moyenne, l'IJssel et le Nederrijn disposeront d'un tirant d'eau de 2,80 m et plus. Dans l'état actuel, un bateau du canal Rhin-Herne, avec un tirant d'eau de 2,55 m, ne pourrait pas naviguer pendant la moitié d'une année moyenne, sur le Nederrijn ou l'IJssel. A l'avenir, cette navigation ne sera impossible que pendant vingt jours. Il faut noter que le Waal, par suite de sa largeur et des dimensions de ses tournants, restera bien supérieur aux deux autres bras du Rhin, comme grande voie navigable.

Le complexe de barrages inférieurs en construction à Hagstein [6] aura deux ouvertures de 48 m chacune pour le passage des bateaux; à côté du barrage, se trouve l'écluse, large de 18 m et longue de 220 m.

Le trafic du Rhin.

Le Rhin est la voie navigable intérieure la plus fréquentée du monde. A son embouchure, se trouvent les ports mondiaux de Rotterdam (maintenant deuxième en importance), d'Amsterdam et d'Anvers. Les communications par voie d'eau sont indiquées sur la figure 16.

Le type de bateau le plus utilisé pour le trafic sur le cours inférieur du Rhin, de Rotterdam à Ruhrort, est le « Rijnaak » (chaland du Rhin) de 2 000 tonnes (100×12×2,8 m); avec celui-ci et, bien entendu, de nombreux petits bateaux, on constitue des files de 3 à 5 chalands tirés par un puissant remorqueur (500 à 2 000 ch.).

On voit de plus en plus, à côté, des bateaux automoteurs, surtout les pétroliers, de 2 000 t par

exemple. Des caboteurs remontent la rivière jusqu'à Cologne et parfois plus en amont. La navigation poussée en est aux premiers temps de son développement.

L'importance du trafic de marchandises le long du Rhin est indiquée dans le tableau 4 :

TABLEAU 4

1957	Trafic remontant le Rhin	Trafic descendant le Rhin
Au total.....	43 millions t	18 millions t
dont : de et pour :		
Rotterdam ...	65 %	27 %
Anvers	8 %	18 %
Amsterdam ..	8 %	4 %
Trafic total.....	61 millions de tonnes.	

Trafic du Rhin.....	61 millions de t
Trafic international total des Pays-Bas	95 millions de t
Trafic maritime hollandais....	78 millions de t

FIG. 16. — Cours d'eau navigable aux Pays-Bas, en communication avec le Rhin.

Trafic maritime.....	95 millions t	soit 50 %
Trafic du Rhin	61 —	33 %
Trafic restant passant la frontière (fluvial)	17 —	9 %
Trafic par camion pas- sant la frontière...	6 —	3 %
Trafic par voie ferrée passant la frontière.	9 —	5 %
	188 millions t	100 %

Le trafic du Rhin est extrêmement important pour les Pays-Bas. L'importance relative est indiquée par les chiffres suivants, pour l'année 1957 également.

L'importance du trafic du Rhin par rapport au trafic total de marchandises passant la frontière est indiquée dans le tableau ci-contre :

La nature des marchandises est la suivante : Trafic montant : fer (26 %), charbon (23 %), pétrole (19 %), produits agricoles (8 %), soit ensemble 76 % ;

Trafic descendant : charbon (23 %), métaux (18 %), engrais chimiques (14 %), produits chimiques (7 %), soit ensemble 62 %.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Ir. P. J. WEMELSFELDER : Daily stage forecasting of the Rhine (XVIII^e Congrès International de Navigation, Rome, 1953, section I, Navigation Intérieure, Q.1c).
- (2) Ir. P. J. WEMELSFELDER : The influence of an ice cover on the discharge conditions of a river (publ. no. 39 de l'Association Internationale d'Hydrologie, Assemblée générale de Rome, tome IV).
- (3) Ir. K. van TIL : Kanalisatie van Nederrijn en Lek — Zandtransportberekeningen. *De Ingenieur*, no. 41, 12 oktober 1956.
- (4) Ir. K. van TIL : Transport of sand in the Netherlands Rhine branches. *Bulletin no. 43-44 of the Permanent International Association of Navigation Congresses*.
- (5) Ir. E. M. H. SCHAAK : Kanalisatie van Nederrijn en Lek-Algemeen overzicht. *De Ingenieur*, no. 37, 14 september 1956. — La canalisation du Nederrijn et du Lek. *Revue de la Navigation Intérieure et Rhénane*, 25 avril 1957.
- (6) Ir. H. C. WENTINK : Kanalisatie van Nederrijn en Lek — Een voorontwerp voor het stuwcomplex te Hagestein. *De Ingenieur*, no. 39, 8 september 1956.

Vue aérienne du Waal. (La neige accentue les épis.)