

La marée de tempête du 1^{er} février 1953 et ses conséquences pour les Pays-Bas

The storm flood on the 1st February 1953 and the consequences for the Netherlands

PAR M. VOLKER

INGÉNIEUR PRINCIPAL AUX TRAVAUX DE RÉCUPÉRATION DE SCHOUWEN-DUIVELAND (HOLLANDE)

Situation hydrographique de la Hollande : la défense contre la mer. — Le phénomène de la marée de tempête sur les côtes hollandaises. — La marée de tempête du 1^{er} février 1953. — Les ruptures. — Les inondations. — Les travaux de récupération : Profondeurs et tracé des chenaux dans une brèche. Principes hydrauliques de fermeture. Exemples de fermeture de quelques brèches à grand débit. — Les leçons de la catastrophe.

Hydrographical situation of Holland; sea defences. The storm flood phenomenon on the Dutch coast. The storm flood on the 1st February 1953. The break-through and the floods. Repair operations: depths and course of channels in a breach. Hydraulic principles in rebuilding. Example of rebuilding some breaches which have a large discharge. Lessons to be learned from the catastrophe.

I. — INTRODUCTION

Les tragiques inondations qui eurent lieu en Hollande la nuit du 31 janvier au 1^{er} février 1953 ont éveillé dans l'esprit du peuple français des sentiments de solidarité et de compassion avec les habitants des régions si durement éprouvées. L'affluence de dons en matériel et en argent en est une des preuves.

La flatteuse invitation qui m'a été faite de venir vous entretenir des aspects hydrotechniques de la marée de tempête du 1^{er} février et de ses conséquences pour notre pays, démontre que le sentiment d'humanité et l'intérêt scientifique ne s'excluent pas.

Vous savez sans doute que le littoral de la Hollande est perpétuellement menacé par la mer. En effet, un cinquième du pays se trouve au-dessous du niveau moyen de la mer et serait par conséquent, s'il n'était endigué, immergé régulièrement deux fois par jour par les hautes mers; plus de deux cinquièmes doivent être protégés

par un système de digues d'une longueur totale de 3.000 km contre les inondations éventuelles des marées de tempête ou des grandes crues fluviales.

On appelle polders les terrains bas entourés de digues. Les polders les plus bas par rapport au niveau moyen de la mer sont formés par des lacs asséchés. On les trouve aux alentours de Rotterdam et d'Amsterdam et dans l'ancien Zuidersee. Là, le niveau descend jusqu'à plus de 6 m au-dessous du niveau moyen de la mer.

Les inondations de 1953 ont été les plus graves de notre histoire depuis le moyen âge. Cette fois, les provinces les plus éprouvées sont la Zélande — un archipel d'îles dans le sud-ouest du pays — et la Hollande méridionale. Sauf quelques exceptions, les polders se trouvent dans ces provinces à une altitude d'environ 2 m au-dessous du niveau moyen de la mer.

Cette situation n'a pas toujours existé. Au dé-

but du moyen âge, ces polders se trouvaient encore au niveau de la mer et pouvaient être débarrassés des eaux superflues par simple vidange à marée basse. Or, on a constaté une montée successive du niveau de la mer par rapport au niveau du terrain. Il est probable — parmi des opinions fort contradictoires — que ce mouvement d'une amplitude mesurée par des marégraphes à 30 cm par siècle, provient à la fois de deux causes :

1. Un affaissement effectif du pays, de 18 cm par siècle;
2. Une élévation effective du niveau de la mer, de 12 cm par siècle.

Dans l'affaissement effectif du pays, c'est le tassement des couches supérieures par suite du drainage qui joue le plus grand rôle. Il con-

viendrait cependant d'y ajouter les autres facteurs suivants :

- a) Tassement sous leur propre poids des sédiments accumulés dans le bassin de la mer du Nord;
- b) Abaissement éventuel des régions périphériques des glaciers par suite de l'élévation du territoire scandinave;
- c) Affaissement du fond du bassin de sédimentation.

Cette théorie du double mouvement de la terre et de la mer permet en tout cas de montrer clairement pourquoi, à partir du IX^e siècle, les Pays-Bas se trouvent menacés par la mer, et de façon de plus en plus aiguë.

II. — LE PHÉNOMÈNE DE LA MARÉE DE TEMPÊTE SUR LES COTES NÉERLANDAISES

Pourtant la plus grande menace pour ce pays vulnérable est constituée par ce qu'on appelle les *marées de tempête*. Dans l'histoire de la Hollande, les dates des plus grandes marées sont connues comme autant de catastrophes. Remontant dans la nuit des temps, les légendes parlent des pertes subies par les Cimbres dans le pays que Pythéas de Marseille décrira plus tard comme les poumons de la mer.

Au cours des temps historiques et jusqu'au 1^{er} février dernier, la plus fameuse marée de tempête reste celle de Sainte-Elisabeth du 18 novembre 1421, lorsque 72 villages disparurent sous les flots. Les chroniqueurs parlent de 10.000 noyés. Il est possible que les niveaux de 1421 aient surpassé ceux de 1953.

1570, 1717, 1775, 1825 et 1916 sont d'autres dates fatales.

De très bonne heure, on s'était aperçu que les grandes dénivellations étaient accompagnées par des vents du nord-ouest sur la mer du Nord, mais c'est vers la fin du siècle dernier que des investigateurs — surtout des météorologues — cherchèrent à établir une relation entre les vents sur la mer et le surhaussement du niveau. On peut citer à cet égard les recherches de ENGELENBURG, de ORTT, de GALLÉ, et surtout la récente publication de SCHALKWIJK.

Il est connu que dans un bassin fermé le frottement du vent sur l'eau produit une dénivellation proportionnelle au carré de la vitesse du vent et inversement proportionnelle à la profondeur du bassin, selon la formule :

$$\eta = \frac{0,036 v^2 l \cos \alpha}{d}$$

où :

η = dénivellation en cm de l'extrémité du bassin;

v = vitesse du vent en m/s;

l = longueur du bassin en km jusqu'à un niveau supposé constant;

d = profondeur en m;

α = angle entre la direction du vent et la direction du bassin.

Etant donné que les profondeurs de la mer du Nord varient entre les 150 et les 20 m et que la profondeur de la partie méridionale, longue de 450 à 500 km, ne dépasse pas les 40 m, on conçoit aisément que par des grands vents soufflant du large le niveau puisse monter jusqu'à plus de 2 ou 3 m au-dessus des niveaux des marées astronomiques.

Il va sans dire que le phénomène réel est plus compliqué. Pour commencer, il faut tenir compte de l'influence de la Manche et surtout du fait que le champ du vent est le plus souvent loin d'être homogène. Sous l'influence du centre d'une dépression qui se déplace sur la mer du Nord, les trajectoires des isobares — et par conséquent des directions du vent — sont courbées. M. SCHALKWIJK a remédié à cette difficulté du calcul en divisant théoriquement la Manche et la mer du Nord en trois compartiments séparés; les dénivellations sont alors calculées pour chacun de ces compartiments et le surhaussement le long de la côte hollandaise est obtenu par superposition de ces trois valeurs respectives.

Enfin, il faut tenir compte de l'influence du retard entre le vent et son effet de rehaussement du niveau.

Un service d'avertissement contre les marées de tempête existe, basé sur les études de M. SCHALKWIJK et autres.

III. — LA MARÉE DE TEMPÊTE DU 1^{er} FÉVRIER 1953

Entre le 26 et 29 janvier, une dépression se forma aux environs de l'Islande. Elle se déplaça d'abord vers l'est en passant au nord de l'Écosse et, dans les premières heures du 31 janvier, elle se replia vers le sud-est pour descendre dans le bassin de la mer du Nord à une vitesse de 40 km à l'heure. Un premier avertissement pour tempête et haute marée fut radiodiffusé. Au cours de la journée du 31 janvier, on constata que, sur une grande surface de la mer du Nord, le gradient des isobares était très élevé, et un second avertissement — cette fois pour marée de tempête dangereuse — fut publié vers 18 h. Dans l'après-midi, le gradient augmenta effectivement encore et, dans la nuit du samedi 31 janvier au dimanche 1^{er} février, la tempête faisait rage.

La marée haute astronomique tomba le dimanche vers 5 heures du matin. C'était une vive eau, mais une vive eau peu développée, la lune se trouvant à l'apogée. Une quinzaine environ auparavant — le 18 janvier — on avait une vive eau plus élevée de 40 à 50 cm, la lune se trouvant alors dans le périgée. Par suite du champ météorologique très étendu sur la mer et des vitesses du vent très élevées, une grande dénivellation put s'établir. Sous l'effet météorologique, on a constaté à Rotterdam un surhaussement maximum de 3,75 m. Au moment de la marée haute, le surhaussement était de 2,75 m à Rotterdam et de 3,30 m sur la côte du Brabant.

Les niveaux ont dépassé les plus hauts niveaux connus de 50 à 70 cm.

Il est peut-être étonnant d'apprendre que les vitesses du vent n'ont pas été excessivement élevées. La moyenne sur une heure n'a pas dépassé les 25 m/s, tandis que le 1^{er} mars 1949 — jour sans marée de tempête exceptionnelle — la moyenne sur une heure s'élevait à 29,5 m/s. La vitesse maximum n'a pas dépassé les 34 m/s contre 38,5 le 1^{er} mars 1949.

Par contre, la durée du vent a été excessivement longue : 23 heures au-dessus de 20 m/s, tandis que, depuis 1898, aucune tempête n'avait duré plus de 12 heures.

Voilà la première cause de la marée exceptionnelle; l'autre réside dans la vaste étendue du champ à grands gradients sur la mer du Nord.

Contrairement à l'opinion publique, l'enregistrement des marégraphes et des anémomètres démontre qu'il n'y a pas eu de raz-de-marée ou de tremblement de mer.

Ce qui a été fatal pour les digues, ce sont les trois hautes mers successives du 31 janvier et du 1^{er} février, la deuxième ayant été la plus élevée et la troisième ayant exercé une influence décisive en achevant beaucoup de ruptures initiales.

En se basant sur la distribution des fréquences des niveaux observés jusqu'ici, on peut déduire par extrapolation que la fréquence d'une marée analogue à celle du 1^{er} février doit être estimée à 2 1/2 %, c'est-à-dire à une fois par 400 ans, ceci pour toute la côte comprise entre Flessingue et le Helder.

La théorie des fréquences admet qu'il n'existe pas dans certaines limites de hauteur maximum du niveau d'eau. On peut en effet s'imaginer un concours de circonstances encore plus défavorable que celui du 1^{er} février; par exemple la même situation météorologique, mais coïncidant cette fois avec vive eau et avec une grande crue des fleuves, ce qui n'était pas le cas le jour fatal.

En principe, on doit donc reconnaître la possibilité d'une catastrophe plus grave encore. Pour les projets futurs, il convient de tenir compte de cette éventualité ainsi que du phénomène de l'abaissement du pays.

IV. — LES RUPTURES

En général, on peut constater que les digues dans l'archipel hollando-zélandais n'avaient pas des dimensions en rapport avec le niveau pendant une marée de tempête aussi exceptionnelle.

Dans ces conditions, sur les 1.100 km de digues maritimes dans le sud-ouest de notre pays — la

distance à vol d'oiseau de Paris à Rome — 500 km de digues — soit la distance de Paris à La Haye — ont été gravement endommagés ou anéantis.

Le nombre de ruptures doit être complété par dizaines. En se limitant aux brèches avec des

courants de marée significatifs, on arrive à un total de 67. Vers la moitié d'avril, il en restait 11 à fermer, les plus grandes, dont 7 dans l'île de Schouwen-Duiveland en Zélande. Enfin, le nombre total de brèches entières ou partielles doit être compté par centaines.

Ce nombre permet d'établir une sorte de statistique des ruptures et d'insister sur les causes de défaillance des digues.

Pour bien comprendre, il faut discerner entre la hauteur du niveau d'eau contre une digue pendant une grande marée et le déferlement des lames contre le talus de la digue.

On peut alors établir les faits d'expérience suivants :

1. Il n'existe pas de cas connu où une digue aurait cédé par suite du manque de stabilité de l'ensemble de la masse, donc sous l'effet de la pression horizontale.
2. Le revêtement du talus extérieur — fait, selon l'exposition au vent, de colonnes de basalte, de carrelage ou de gazon — n'a pas souffert. Le plan du talus extérieur n'était pas trop incliné.

En fait, *presque toujours la rupture a été causée par un éboulement du talus intérieur*, par suite :

1. Des lames déferlant sur le talus qui dépassaient la crête et retombaient sur le talus;
2. Du fait que, dans beaucoup de cas, la crête de la digue était tout simplement plus basse que le niveau pendant la grande marée et que, par conséquent, il y avait pendant quelques heures un déversement continu d'eau sur le talus intérieur. Ainsi,

les digues les moins exposées — par exemple celles qui formaient les quais d'un port et qui étaient donc les plus basses — se sont le plus souvent rompues. Enfin,

3. La rupture a été introduite par un glissement du talus intérieur sous l'effet d'une surpression hydrostatique dans les pores, et ceci parfois sans qu'il y ait eu déversement d'eau sur la pente.

Il convient d'insister sommairement sur le phénomène hydraulique qui a lieu dans une brèche de la digue de ceinture d'un polder inondé. En principe, ce phénomène paraît très simple; en réalité, il est très compliqué et les calculs nécessaires à l'établissement d'un programme de fermeture demandent beaucoup de temps.

La marée se propage par la brèche dans le polder — c'est-à-dire dans la cuvette. Par marée montante, il se produit un remplissage, par marée descendante une vidange. Par suite de la surface du bassin et du frottement sur le terrain, la marée dans le polder est retardée, par rapport à la marée extérieure, tandis que l'amplitude est affaiblie.

Il se produit donc deux étales de courant dans les brèches : celle suivant avec un certain écart la haute mer et celle suivant la basse mer de la marée à l'extérieur. Ces étales ont une grande importance pour l'exécution de travaux.

Dans la partie centrale de la région sinistrée, la pleine mer s'élève à 1,5 m au-dessus du niveau moyen; la mer marne de 3 m tandis que le terrain se trouve à peu près à la hauteur de la basse mer. En dehors des étales, il y a donc toujours un courant, soit du flot ou du jusant. Les vitesses maxima varient entre 3 et 5 m.

V. — LES INONDATIONS

Il est inutile de dire que les dizaines de brèches faites dans les digues maritimes de la Hollande méridionale et de la Zélande ont donné lieu à des inondations à une échelle que notre pays n'avait pas encore connue, sauf pendant la dernière guerre lorsque les Allemands avaient inondé 7 % de la surface totale du pays, d'ailleurs par des inondations préparées.

Je vous ai déjà dit que la longueur des digues endommagées ou rompues au cours de la nuit fatale du 31 janvier dernier dépasse la distance d'Amsterdam à Paris. Derrière ces digues, des centaines d'habitants sont morts si brusquement qu'ils n'ont rien pu saisir de ce qui arrivait; d'autres ont péri deux ou trois nuits après, victimes du froid et de l'épuisement.

Le seul refuge sec en effet qui leur restait, c'étaient les toits des maisons, qui furent parfois détachés des murs pour s'en aller à la dérive. Dans ces circonstances, l'évacuation de quelques dizaines de milliers de personnes tassées sur ces radeaux ou sur les tronçons intacts des digues fut un problème pour lequel les seuls moyens de la Hollande auraient été insuffisants. Il fallait disposer d'un grand nombre de bateaux à faible tirant d'eau à cause des obstacles cachés sous l'eau, d'hélicoptères, etc...

Cependant, de tous côtés des secours accoururent.

L'armée française envoya deux bataillons du génie équipés de matériel moderne. Les autorités militaires américaines en Allemagne envoyèrent

des hélicoptères. Des centaines de personnes des endroits le plus difficilement accessibles durent leurs vies à ce sauvetage par avion. Les avions permirent également de lancer des bouées et des canots de sauvetage.

Malgré tout le secours accouru, on compte au total 1.800 victimes. 133 villes et villages disparurent sous les flots, ainsi que 160.000 hectares correspondant à 6 % de la surface arable du pays.

Ce fut seulement au prix d'un grand effort dans l'après-midi du dimanche tragique qu'on put maintenir les digues protégeant le véritable centre du pays, digues dont dépendait le sort de Rotterdam, d'Amsterdam et même d'une partie de La Haye. Une inondation de ces grands centres aurait mené le pays à sa ruine.

Il est une légende qui a toujours frappé l'imagination des étrangers et selon laquelle un petit garçon bouchant de son doigt un trou par lequel l'eau commençait à percer une digue, aurait prévenu une rupture.

Cette légende a vu sa réalisation dans une petite ville derrière une digue dont la partie supérieure était composée de palplanches supportées par un pilier. Au cours de la tempête, le pilier menaçait à un moment donné de s'écrouler; c'est

alors qu'une centaine de personnes, placées en rangées, s'étayant par les épaules, donnèrent durant toute la nuit l'appui nécessaire, sauvant ainsi leur ville d'une catastrophe certaine.

A d'autres endroits, les habitants ont réussi à sauver les digues menacées, en disposant des sacs de sable ou des voiles aux endroits déjà entamés par les lames. Avec l'aide des détachements français, des militaires hollandais et étrangers ont pu faire, çà et là, des rétablissements provisoires, arrêtant ainsi l'extension de l'eau.

Trop souvent, hélas! ces moyens improvisés n'ont pas suffi, et dans les premiers jours suivant le désastre il fallut reconnaître qu'on se trouvait devant des problèmes hydrotechniques sans exemple dans l'histoire de notre pays, histoire pourtant riche en batailles sensationnelles avec la mer.

Les travaux du Zuidersée durent être arrêtés. La récupération des terrains inondés demande tous les efforts des techniciens et du matériel de construction de digues.

Ainsi de grands travaux, estimés au total à une quarantaine de milliards de francs français, sont actuellement en cours d'exécution.

VI. — LES TRAVAUX DE RÉCUPÉRATION

Avant de pouvoir m'étendre sur le principe d'aveuglement des brèches, je voudrais parler sommairement de l'aspect général des profondeurs et des courants.

Le phénomène le plus frappant est celui de l'érosion. En effet, dans les régions inondées, le profil géologique se trouve constitué par une couche arable de sablon d'une épaisseur d'environ un mètre reposant sur du sable très fin, très mouvant, d'origine marine. Il suffit d'un faible courant pour que ce sable soit attaqué par l'eau. Il se forme alors des cratères dans le sous-sol, et on a enregistré dans les brèches, au moyen de sondes écho, des profondeurs atteignant 38 m, sous l'influence de courants alternatifs de plus de 3 m par seconde.

Ce fait, ainsi que la présence des grands courants, rendent souvent un aveuglement sur le tracé primitif impossible.

Or, l'érosion produit encore d'autres conséquences fâcheuses. Etant donné les niveaux de la marée et du terrain, il est aisé de constater qu'à marée basse, les eaux recouvrant le terrain se déversent vers le cratère de la brèche, où règne la marée basse de l'extérieur. Le bord du terrain est ainsi affouillé et l'on peut observer la formation de chenaux dans le terrain intact, chenaux qui s'avancent de plus en plus vers

l'intérieur du polder. Cette érosion progresse souvent très vite. A Walcheren — île inondée par les Alliés en 1944 — on a observé des vitesses de 5 m par jour. Il dépend de la constitution pédologique du terrain, de la présence de fossés ou canaux d'évacuation qui attirent le courant, et de la présence de légères ondulations dans le terrain que ces vitesses soient dépassées. Dans l'île de Schouwen on a parfois observé des vitesses d'érosion de 40 m par jour.

Si une fermeture selon le tracé primitif est impossible, ce qui est très fréquent, il ne reste plus alors exactement comme dans une bataille qu'à reculer sur une ligne plus en arrière pour essayer de verrouiller la pénétration ennemie. C'est d'ailleurs la même tactique qu'employèrent nos ancêtres — certes moins puissants que nous en matériel de dragage mais non moins avisés en matière hydraulique — pour repousser notre ennemie héréditaire.

Dans quelques cas, on peut procéder à la fermeture par la construction d'une digue du côté extérieur, notamment là où l'on se trouve en présence de hauts fonds — émergeant à marée basse — du côté extérieur de la digue.

Du point de vue hydraulique, on peut distinguer des fermetures :

1° Passant par un chenal d'érosion ou par l'un des bras d'un cratère, donc avec un grand profil d'écoulement dans le tracé (fig. 1);

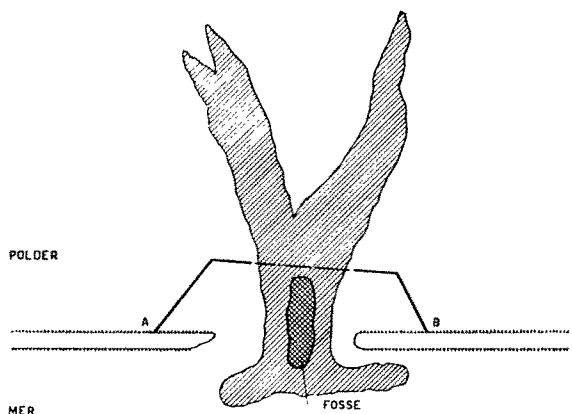
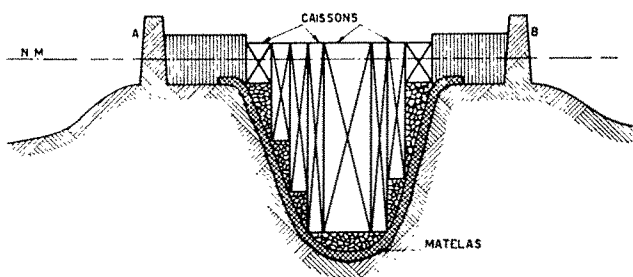


FIG. 1. — Principes hydrauliques de fermeture. Aveuglement avec profil d'écoulement (I).

2° Passant par le terrain intact, donc avec un profil d'écoulement qui n'est pas en majeure partie concentré sur une petite largeur, mais réparti sur toute la longueur du tracé (fig. 2).

Dans les deux cas, la fermeture peut s'opérer par rehaussement d'un seuil sur toute la longueur du tracé jusqu'à la hauteur de la pleine mer, ou par rétrécissement consécutif de la longueur.

La difficulté constante de chacune des méthodes de fermeture réside dans l'augmentation des vitesses parallèlement à la diminution du profil, difficulté qu'on peut seulement surmonter par l'emploi de matelas de fascines lestés d'enrochements, en vue de protéger le fond contre les affouillements.

Dans la première méthode — avec un grand

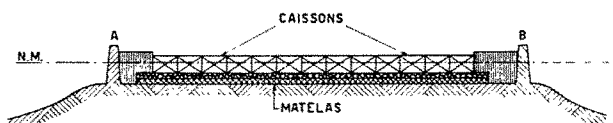
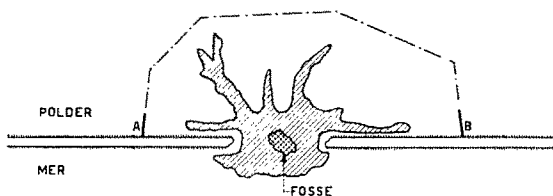


FIG. 2. — Principes hydrauliques de fermeture. Cernement de la brèche sur le terrain naturel.

profil de fermeture — après avoir protégé le fond des passes par des matelas de fascines, on peut construire des tronçons de digues entre les chenaux sans de trop grandes difficultés et sans employer de matelas sur le terrain même. L'écoulement en effet s'effectue par les grands profils et n'est que médiocrement influencé par le mouvement de l'eau sur le terrain entre les profils.

Les profils de fermeture doivent être obstrués le plus vite possible afin que les matelas ne soient pas exposés trop longtemps aux grandes vitesses.

Dans la deuxième méthode — celle sans profils concentrés — les vitesses initiales augmen-

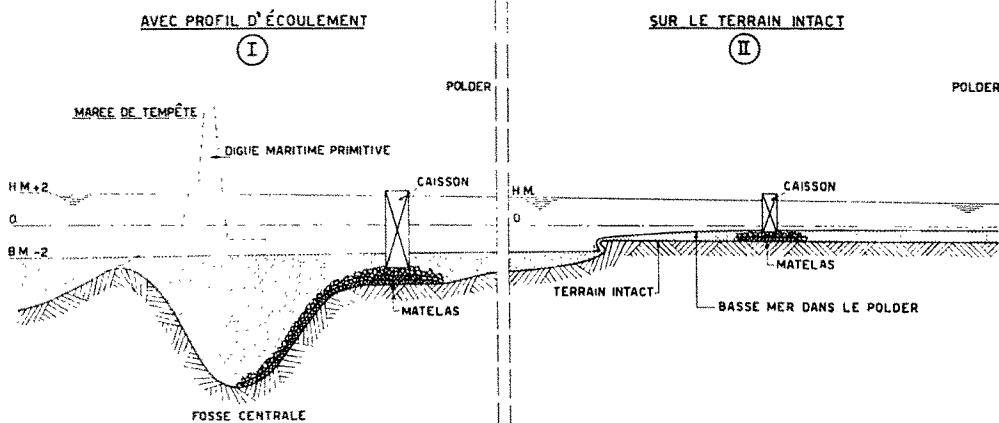


FIG. 3. — Fermeture.

tent notablement dès qu'on commence à barrer une faible partie de l'ouverture. Il faut donc commencer par protéger le terrain par des matelas de fascinages sur la plus grande partie du tracé (fig. 3). L'avantage de cette méthode dans de telles circonstances réside dans le fait que les chutes, et par conséquent les vitesses, sont plus faibles que dans l'autre cas, puisque la marée basse sur le terrain ne descend pas jusqu'au niveau de la basse mer à l'extérieur, qui se propage seulement dans les cratères et chenaux profonds (fermeture de la brèche de l'île de Schouwen — débit : $140 \times 10^6 \text{ m}^3$ — par une digue de cerneement longue de 4 km).

Au point de vue technique, on peut distinguer plusieurs procédés.

Mais, quel que soit le procédé employé, l'essentiel reste toujours la protection du fond par des matelas de fascinages.

Il est étonnant de constater que cette méthode, qui remonte à plusieurs siècles, n'a pas changé et que rien d'équivalent ou de meilleur n'a pu encore être trouvé. Reconnaissons les avantages évidents de cette méthode, primitive en apparence : légèreté (facteur important pour un sous-sol avec faible port), flexibilité (les matelas épousent le fond et en suivent les ondulations) et surtout imperméabilité pour le sable (la chute est répartie sur une grande longueur). Sur une base de matelas, les différents procédés techniques de fermeture sont les suivants :

1. LEVÉE DE PIERRES.

A l'aide de grues flottantes, de chalands basculeurs et de chalands déchargés à la main, on élève un bourrelet de pierres. Il faut disposer de blocs assez importants mais toujours maniables et d'un poids spécifique élevé. Les plus utiles sont des blocs de basalte, qui doivent être importés d'Allemagne et qui, par conséquent, reviennent assez cher. La brèche d'Oosterland (Schouwen) a été fermée ainsi. Cette brèche (large de 120 m) a été fermée par une levée de blocs de pierre, longue de 180 m et disposée un peu à l'intérieur de la brèche. Il n'a pas fallu couler moins de 15.000 tonnes de pierre pour édifier la digue en pierre ayant une base au-dessus du niveau moyen de la mer d'une largeur de 3,5 m et une crête haute de 1,5 m au-dessus. Détail piquant, tout près de cette lourde levée se trouvait une fosse d'une profondeur de 17 m avec une inclinaison de 1 : 2! Contrairement à toutes les spéculations de la mécanique du sol, la masse totale ne s'est pas effondrée. La levée de pierres doit être ensuite emballée dans l'argile afin de la rendre étanche. Enfin, on peut refouler du sable dans les excavations et renforcer le profil.

2. — LEVÉE DE FASCINES.

C'est le procédé classique. Sur le matelas de fondation, d'autres matelas — d'une épaisseur aussi grande que possible, par exemple, d'un mètre — sont coulés successivement, afin de relever un seuil. Au moment où, par suite du manque de profondeur, on ne peut plus continuer ainsi, on profite de la basse-mer pour élever le plus vite possible une levée de faisceaux ou une diguette de sacs de sable jusqu'à une hauteur juste au-dessus de celle de la pleine mer suivante.

3. — FERMETURE PAR CAISSONS.

C'est le procédé moderne. Il est assez coûteux, non sans risques, mais il présente l'avantage inappréciable de la vitesse de travail. Ainsi, à Zieriksee, où une brèche a été cernée par une digue de 1.100 m sur le terrain intact, on a fermé une ouverture de 425 m en trois jours en coulant des caissons assemblés de 11 m de long.

Une difficulté de cette méthode élégante est constituée par le problème du raccordement étanche entre l'élément préfabriqué et les digues en terre ou les talus des chenaux.

4. — AUTRES MÉTHODES.

Si, par bonne fortune, on dispose d'argiles résistantes (argile glaciaire du Zuidersee ou argile du tertiaire de Boom en Belgique), on peut en profiter pour remblayer en combinaison avec des matelas de fascinages des seuils sur le fond.

Parfois, il est possible d'installer un appontement sur la passe, permettant un transport facile de matériaux de remblayage. Enfin, dans des cas très favorables (petites vitesses et étales de longue durée), on peut profiter de la grande capacité de dragues refouleuses modernes (étranglement de la brèche de Sirjansland à Schouwen par colmatage avec du sable et des matelas).

Il est intéressant de comparer les travaux actuels de fermeture des brèches avec les procédés en usage chez nos ancêtres.

On doit d'abord remarquer que le principe hydraulique n'a pas changé. Si les « Anciens » ne connaissaient pas les équations différentielles du mouvement de l'eau, ils étaient par contre parfaitement au courant du changement de la marée, des étales et des courants pendant une fermeture.

Il est vrai que le développement de la technique a mis à notre disposition des machines de dragage à grande capacité. Toutefois, il faut reconnaître que, sauf certaines facilités, la fermeture

elle-même doit être faite avec les mêmes moyens qu'autrefois et qu'elle demande toujours beaucoup de main-d'œuvre. Ces facilités sont l'emploi de remorqueurs, de chalands pontés, etc. L'avantage du soi-disant « grand matériel » se manifeste seulement après la fermeture pour la con-

solidation de la victoire, tandis qu'autrefois on ne pouvait remblayer en beaucoup de temps qu'un faible volume de sable ou d'argile.

Il y a une nouveauté dans les méthodes : c'est l'emploi de grands éléments préfabriqués en ciment armé, qui constitue la méthode de l'avenir.

VII. — LES LEÇONS DE LA CATASTROPHE

Il est très probable que la catastrophe du 1^{er} février ne se reproduira pas avant longtemps, mettons avant un siècle. Cependant, l'agression récente a éveillé des sentiments de rancune et l'on se demande quelles leçons peuvent être tirées de la catastrophe.

Dans une allocution prononcée récemment à La Haye, le directeur-général des Ponts et Chaussées néerlandais a examiné la question de la culpabilité.

Aux Pays-Bas, l'entretien des digues est faite par les syndicats autonomes des polders sous la surveillance des Ponts et Chaussées des provin-

ces. Or, cet entretien n'a pas été négligé : les digues se trouvaient en parfait état. Si cependant elles ont cédé, c'était tout simplement parce qu'elles étaient incapables de résister à une marée de tempête d'une fréquence d'une fois par quatre siècles. Ce fait n'était pas inconnu, mais on a hésité devant les sacrifices à faire, sacrifices qui auraient empiété dans le domaine des mesures sociales, de la défense nationale, etc. L'avertissement par les spécialistes de la possibilité d'une grande catastrophe était considéré comme « une plaisanterie moisie de quelques savants enfermés dans leur tour d'ivoire ».

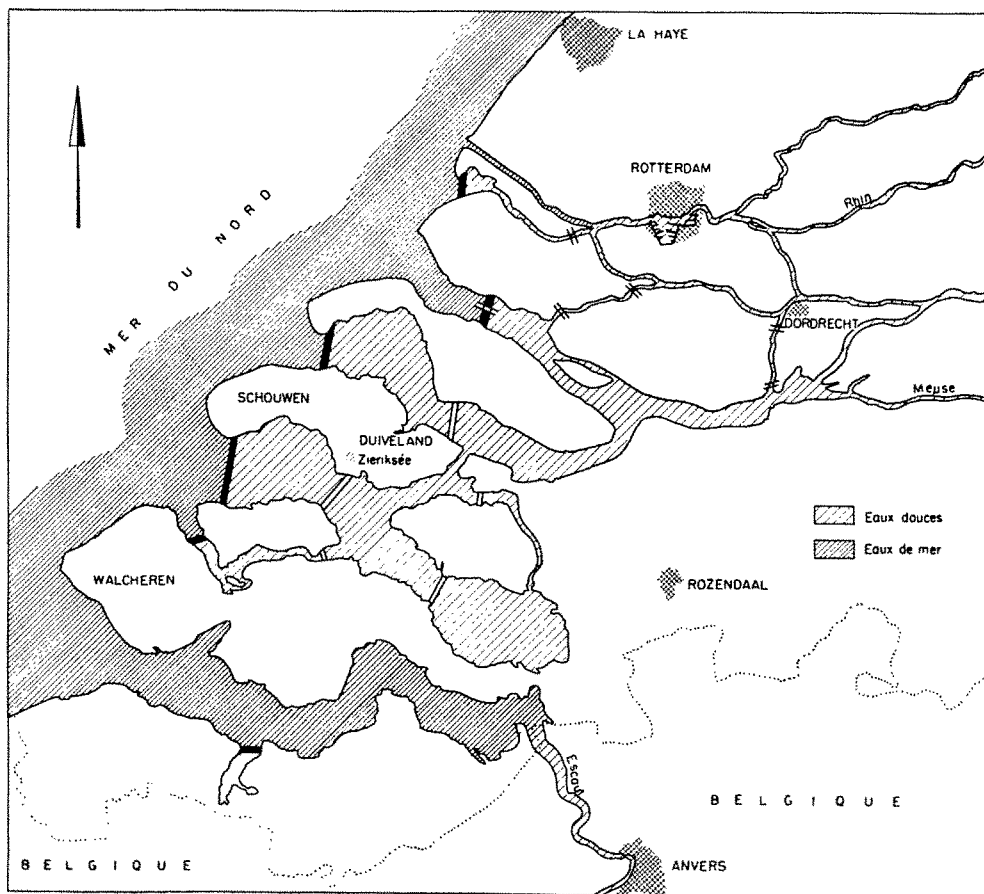


FIG. 4. — Suggestion pour une fermeture partielle des embouchures du Rhin et de la Meuse.

La possibilité est maintenant indiscutable et la question se pose : quelles mesures faut-il prendre ?

Il paraît tout naturel de rehausser les crêtes des digues et de renforcer les profils. Ce travail doit être fait sur toute la longueur des digues maritimes de l'archipel hollando-zélandais, c'est-à-dire, sur une longueur de 1.100 km, la distance à vol d'oiseau de Paris à Rome. Admettons qu'on puisse, par ces travaux fort incommodes et coûteux, garantir une sécurité à peu près absolue, il restera toujours à faire face à une autre offensive de la mer : l'accroissement progressif de la salinité des eaux dans les polders, particulièrement dans les îles de la Zélande encerclées par l'eau salée. Le seul remède est constitué ici par la transformation des bras de mer en bassins d'eau douce, alimentés par les eaux du Rhin et de la Meuse. Pour cela, il faudra fermer les embouchures en excluant les entrées des ports d'Anvers et de Rotterdam. Par des digues de barrage d'environ 20 km au total, on pourra s'armer en même temps d'une première ligne de défense, formant un raccourcissement très sensible de l'ancienne frontière de 1.100 km (fig. 4).

Seulement, il faudra construire des digues de barrage en pleine mer sur un fond mouvant dans des profondeurs dépassant 30 ou 40 m et dans des courants de marée assez forts.

Une fois de plus, ces travaux ne seront pas

justifiés par la valeur des terres protégées, mais par le simple désir de survivre en plein accord avec la devise de la Zélande : « Je lutte et j'émerge des flots. »

L'histoire de la Hollande est l'histoire de l'amitié et du combat avec la mer. La mer a ouvert notre pays au commerce avec des pays lointains; la couche arable de nos meilleures terres est constituée par un sédiment marin.

Le dimanche tragique du 1^{er} février dernier nous a confrontés, une fois de plus dans l'histoire, avec l'ennemie. Une fois de plus, la Hollande a été durement éprouvée par celle qui pourtant l'a créée dans son sein.

L'ennemie a été plus forte que nous, mais la contre-offensive est déclenchée. L'issue de la bataille ne peut être douteuse. Après la reconquête, les travaux d'assèchement de terres nouvelles seront repris.

Le jour viendra où les visiteurs français s'étonneront de nouveau de la richesse des terres arrachées aux flots et nous aurons un grand plaisir à leur rappeler le secours qui nous a été apporté par eux pendant les jours sombres.

Je suis reconnaissant en tout cas d'avoir pu transmettre déjà à mes auditeurs de la Société Hydrotechnique de France les sentiments de reconnaissance envers la France des régions sinistrées.

DISCUSSION

(Président : M. BARRILLON)

M. le Président traduit l'émotion du Comité Technique devant la projection (1) et l'exposé faits par M. VOLKER de la catastrophe du 1^{er} février 1953 et aussi devant le courage du peuple hollandais dans sa lutte contre la mer. M. le Président félicite M. VOLKER de la perfection avec laquelle il parle le français et le remercie vivement d'être venu nous faire son exposé.

La communication de M. VOLKER suggère deux remarques à M. DE ROUVILLE :

1° Les dépressions à direction nord-sud qui ont tendance à maintenir un vent de même direction et une pluie de plus longue durée que les dépressions à direction ouest-est, sont à l'origine de plusieurs catastrophes dans nos régions : telles sont la catastrophe du 1^{er} février 1953 en Hollande et celle du 7 février 1934 qui a provoqué la chute de la digue d'Alger.

2° Dans les défenses de la Vendée il a été constaté que les digues de fortune, si elles étaient construites en avant sur la plage pour obstruer une brèche, donnaient de meilleurs résultats que celles qui seraient exécutées à l'intérieur où le terrain est tout de suite plus érodé, mais les conditions en Hollande peuvent être différentes.

M. HUPNER demande à M. VOLKER :

1° De lui indiquer l'origine et le champ d'application de la formule $\eta = 0,036 v^2 l \cos \varphi / d$ employée pour pré-

voir la surélévation de la marée en fonction des conditions météorologiques : il cite les données des Services Maritimes de la Rochelle sur la tempête des 22 et 23 février 1935 (coefficient de marée 84), pression barométrique : 732 mm; vitesse du vent : 32 m/s; surcote : 1,150 m;

2° S'il n'y a pas une réflexion d'onde entre les côtes anglaises et hollandaises;

3° De lui donner son avis sur le procédé employé en 1953 en Hollande pour récupérer les terrains de culture, pollués par l'eau de mer, en y répandant du gypse.

M. VOLKER répond à M. HUPNER :

1° La formule de la dénivellation a été déduite d'observations faites sur le Zuidersee par la Commission Lorentz pour la formation des marées. Cette formule a été confirmée par des observations sur le lac IJssel. Sa forme a été confirmée également dans une thèse anglaise du Dr SCHALKWIJK sur la mer du Nord (Storm surges on the North Sea). Elle n'est valable que pour des vitesses du vent ne dépassant pas 25 m/s (qui sont d'ailleurs celles de la mer du Nord) et les profondeurs du lac IJssel (4 à 10 mètres).

2° Il y a eu, en effet, pendant cette tempête, une onde solitaire qui s'est déplacée le long de la partie septentrionale de la côte anglaise, mais qui ne s'est pas manifestée vers le sud; ce phénomène s'est reproduit le 12 avril 1953; un navire observateur est maintenant ancré dans la mer du Nord pour mesurer les vitesses du vent pendant les tempêtes.

(1) L'exposé de M. VOLKER a été suivi de la projection d'un film pris pendant la catastrophe et au cours des travaux de sauvetage et de colmatage.

3° Pour l'amendement des terrains inondés :

a) Sur les anciens polders décalcifiés par une culture déjà ancienne, comme ceux qui ont été inondés en février dernier, on répand en effet du gypse qui substitue son calcium au dépôt de sodium aride laissé par la saumure infiltrée; le chlore, qui n'a pas pénétré profondément, est lessivé par les eaux de pluie.

b) Mais sur les nouveaux polders, comme ceux du Zuidersée, où se trouve une provision de calcium qui n'a pas encore été absorbée par l'agriculture, il n'y a pas lieu de chasser le sodium au moyen de gypse et il suffit d'utiliser le chlore en excès par addition de calcium.

M. DUPUY demande à M. VOLKER si, lors du refoulement des eaux d'inondations, on avait envisagé la fermeture des brèches au moyen de refoulements hydrauliques de matériaux et, plus particulièrement, si des études, en laboratoire, n'avaient pas été poursuivies sur la fermeture par refoulement hydraulique d'un passage où s'écoule un courant alterné, ce qui est le cas ici; il semble en effet que des techniques spéciales et la conception de têtes à refoulement appropriées puissent permettre d'obtenir un meilleur rendement dans l'élévation de digues sous l'eau.

M. VOLKER répond qu'on va essayer, dans les travaux de récupération de l'île Schouwen-Duiveland, un système inspiré par l'étude de la filtration et consistant à soustraire l'eau par des filtres d'une masse de sable refoulé par une drague suceuse, dans le but de favoriser l'agglomération des particules de sable dans un milieu déprimé.

M. VANTROYS demande à M. VOLKER si la dénivellation donnée par la formule empirique $\eta = 0,036 v^2 l \cos \varphi / d$ s'entend par rapport au niveau maximum, moyen ou minimum en l'absence de vent, et quelle est l'influence de la durée du vent.

M. VOLKER répond que la formule s'applique seulement aux états stationnaires et que la dénivellation est progressive à partir d'une variation brusque de la vitesse du vent et tend vers un maximum qui se produit avec

un retard qui est fonction de la profondeur du bassin et de sa longueur dans le sens de la propagation (quelques heures pour le lac IJssel, six heures pour la mer du Nord, d'après M. SCHALKWIJK).

M. Christian BEAU demande au conférencier si les services hollandais de prévision des inondations sont en rapport avec les services internationaux de prévision d'intensité de la houle fonctionnant dans l'Atlantique Nord.

M. VOLKER répond que cette liaison n'existe pas encore mais que les services hollandais l'envisagent comme très utile.

M. le Président demande à M. VOLKER :

1° La probabilité d'un vent de si longue durée que celui qui a provoqué la catastrophe;

2° L'abaissement du niveau des polders depuis l'endiguement.

M. VOLKER répond :

1° Qu'il ignore la probabilité du vent, mais pourra la demander aux météorologues.

2° Qu'on a observé depuis 1800 un abaissement de 20 à 25 cm par siècle, qui aurait commencé en l'an 1100 par une transgression marine et correspond à la profondeur des polders actuels, 2 m au-dessous du niveau de la mer : la plus grande partie de cette dénivellation serait due, d'après les mécaniciens du sol, à un tassement des couches d'argile et de tourbe dans le sous-sol, tassement favorisé par l'amélioration progressive des systèmes de pompage et de drainage; toutefois les géologues admettent que l'abaissement serait dû pour 5 cm à un effondrement géosynclinal des couches les plus profondes, pour 5 cm au rehaussement absolu et général du niveau moyen de la mer, pour 5 cm au tassement des couches d'argile et de tourbe sus-mentionné et pour 5 cm au tassement des couches de sable plus anciennes; de toute façon, il n'y aurait pas d'effet du vent.

M. le Président remercie M. VOLKER et lui demande d'ajouter ces renseignements à son mémoire.

AVIS DE CONCOURS

Un concours est ouvert en vue de l'exécution des travaux envisagés pour l'équipement d'un premier ensemble de 8.100 hectares de périmètre d'irrigation des Triffa (Maroc oriental) par les eaux dérivées de la Moulouya.

Le montant du cautionnement provisoire est fixé à 5.000.000 de francs.

La date limite de remise des plis recommandés renfermant les offres des concurrents, soit à la poste, soit aux bureaux de la Circonscription de l'Hydraulique à RABAT, est fixé au samedi 27 février 1954, avant midi.

Le dossier pourra être consulté :
 dans les bureaux de l'Office du Maroc, à :
 PARIS : 19, rue des Pyramides;
 LYON : Chambre de Commerce, rue de la République;
 BORDEAUX : Chambre de Commerce, place Gabriel;
 MARSEILLE : 2, rue Beauvau;
 STRASBOURG : Chambre de Commerce, place Gutenberg;
 LILLE : 116, rue de l'Hôpital-Militaire;
 NANCY : chez M. BRUN, 40, rue Gambetta.
 dans les bureaux de la circonscription de l'Hydraulique et de l'Electricité à RABAT;
 dans les bureaux de la Subdivision Hydraulique à BERKANE.