

Généralités sur l'entreprise du Plan Delta

Aspects hydrauliques et techniques du problème

General comments on the Delta Plan

Hydraulic and technical aspects of the problem

PAR A. DE ROUVILLE,

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSEES
PRÉSIDENT DE LA SECTION D'HYDRAULIQUE FLUVIALE ET MARITIME DE LA SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE

Le conférencier associe un rappel de sa précédente communication devant l'Académie de Marine sur le même sujet du plan Delta avec une analyse des sept volumes actuellement parus, intitulés « Beschouwingen over stormvloed en Getijbeweging (Staatsdrukkerij-en uitgeverijbedrijf — S'Gravenhage).

Ceux-ci contiennent respectivement le rapport final et le rapport préliminaire de la Commission du Delta (vol. I), des recherches météorologiques sur les phénomènes constatés en 1953 et sur les phénomènes analogues ou possibles de la même nature (vol. II), des considérations sur les marées et les ondes de tempête (vol. III et IV), des études sur le plan d'ensemble (conception et travaux proposés, conséquences de tous genres, essais sur modèles) (vol. V), des recherches concernant les projets de digues et de barrages ainsi que les aspects sociologiques du plan Delta (vol. VI).

Tandis que la conférence à l'Académie de Marine avait un caractère assez général, plutôt descriptif, et s'étendait aux divers points de vue d'où l'on peut considérer l'entreprise du plan Delta, l'analyse des sept volumes de la Commission est plus particulièrement orientée vers les aspects hydrauliques et techniques du problème.

The speaker associates a review of his previous lecture on the Delta Plan before the Naval Academy with an analysis of the seven volumes published to date under the title « Beschouwingen over stormvloed en Getijbeweging » (Staatsdrukkerij-en uitgeverijbedrijf — S'Gravenhage).

These volumes contain the Delta Commission's final and preliminary reports (Vol. I), meteorological research into the phenomena observed in 1953 and other possible similar phenomena (Vol. II), considerations on storm tides and waves (Vols. III and IV), studies on the Plan as a whole—i.e. proposed designs and work and their possible effects, and model tests—(Vol. V), and research in connection with the dam and dyke projects and the sociological aspects of the Delta Plan (Vol. VI).

Whereas the author's lecture before the Naval Academy was of a more descriptive general nature and discussed the various points of view from which the implementation of the Delta Plan may be considered, his analysis of the seven volumes published by the Delta Commission is more specifically concerned with the hydraulic and technical sides of the problem.

RAPPORT DE LA COMMISSION POUR LE PLAN DELTA

On aura déjà vu, par notre conférence devant l'Académie de Marine (1) dont le texte a été envoyé avant le présent compte rendu, les circonstances qui ont accompagné le travail de la

(1) Nous renverrons à plusieurs reprises aux pages et paragraphes de cette conférence à l'Académie de Marine, pour éviter les répétitions et alléger l'impression du présent rapport.

Commission pour le Plan Delta : une tempête assez exceptionnelle à la fin de janvier 1953 (p. 5, dernier alinéa, et 6 de la conférence à l'Académie de Marine), l'état des digues de la province de Zélande, les différentes solutions pour y remédier, les avantages du projet d'ensemble retenu aux points de vue de la défense du pays contre l'inondation, de la navigation, de l'agri-

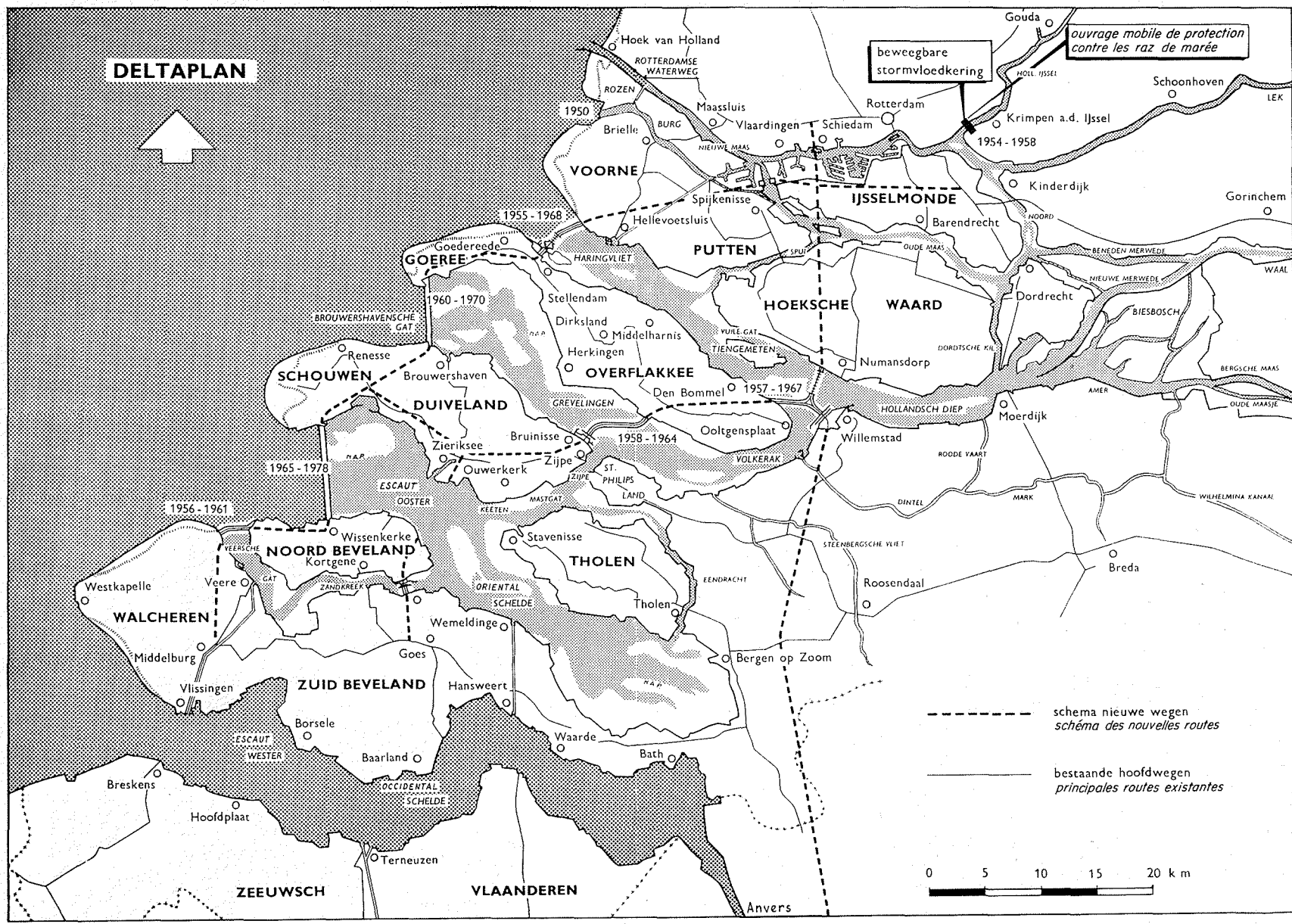


Fig. 1

culture, de l'approvisionnement en eau douce (valeur plus grande) (p. 12, dernier alinéa de la conférence à l'Académie de Marine), de la circulation terrestre (p. 14, 3°, 4° alinéas de la conférence à l'Académie de Marine), des sports nautiques, plus démocratiques (p. 15, 2° alinéa de la Conférence à l'Académie de Marine), de la pêche, tous ces avantages sacrifiant délibérément les industries ostréicoles et mytilicoles (p. 13, 5° alinéa de la conférence à l'Académie de Marine).

On lira ensuite (pp. 8 et 9 conférence à l'Académie de Marine) la consistance générale du nouvel endiguement projeté avec ses quatre digues primaires ou extérieures, ses quatre digues secondaires ou intérieures, plus un barrage éclusé sur l'Yssel hollandais (fig. 1).

On éclairera enfin la nomenclature et la désignation des diverses voies d'eau mises en cause en lisant la seconde moitié de la page 6 et la page 7 de la conférence à l'Académie de Marine.



Les rapports qui nous ont été communiqués pour en rendre compte devant la S.H.F. se présentent actuellement sous la forme de six cahiers cartonnés, de près de 200 pages chacun (1 275 pages en tout), bien imprimés, avec de nombreux graphiques et dessins, auxquels s'est ajoutée ou substituée en tout dernier lieu une traduction en anglais du rapport final du Comité (2).

C'est par lui qu'il convient de commencer.

RAPPORT FINAL DU COMITÉ (ou rapport n° 1). — Le Comité n'accepte de responsabilité que pour ce rapport, à l'exclusion des rapports partiels dus à des collaborations diverses et relatées dans les cinq autres volumes. C'est un résumé ordonné de tout ce qu'on a rassemblé de connaissances sur l'objet et la réalisation du Plan Delta. Il se développe en 100 pages, 20 figures, graphiques ou cartes. Il est suivi de cinq pages de résumé, en sorte que les présents commentaires peuvent être considérés comme un condensé au 3° degré d'une masse énorme de considérations, toutes de grande valeur, qui mériteraient un meilleur sort, n'était le degré de fatigue ou de lassitude qu'on pourrait redouter pour les auditeurs.

La simple énumération des têtes de chapitre suffirait à éclairer ceux-ci sur les nombreuses faces d'un problème en quelque sorte polyédrique :

2. Nécessité d'accroître la sécurité;
3. Niveaux de fait et niveaux à retenir pour la mer et la côte;

4. Le choix à faire entre la solution du renforcement des digues existantes et celle de la fermeture des bras au Sud-Ouest;

5. Mesures et précautions à prendre dans la solution de la fermeture (pour l'endiguement, les besoins en eaux douces domestiques, dispositions techniques pour les fermetures des enceintes);

6. Détails de ces précautions aux divers points de vue des afflux d'eau par la mer ou les fleuves, de l'eau douce, des courants, des mouvements de sables, des atterrissements, du sport;

7. Emplacements des digues de clôture;

8. Renforcement des protections existantes et complémentaires à ces protections (problèmes des grains et rafales, de la subsidence du sol, consolidation des dunes, constructions à éviter dans le champ des ouvrages de protection);

9. Seconde ligne de défense, en arrière des ouvrages principaux et limitation du danger d'inondation;

10. Administration et exploitation des services de protection;

11. Conclusion.

Le rapport final énumère (pp. 16 et 17) les collaborations et travaux antérieurs (5 de 1953 à 1955) qui ont aidé le Comité Technique dans sa tâche. Celui-ci a tenu 46 séances plénières sans compter les séances de groupes.

Les sommes allouées par le gouvernement (1 milliard 100 millions de florins, dont 390 millions pour la réparation des ouvrages) furent nettement inférieures aux dommages subis par les ouvrages et la population.

Le rapport passe en revue les différentes sections du littoral néerlandais en ce qui concerne sa protection ancienne, et conclut à ce que sa défense est insuffisante, même en Groningue et dans les îles de Frise notamment, parce qu'il n'existe pas de seconde ligne intérieure d'arrêt pour l'invasion des eaux (pp. 21-23).

Le rapport examine les niveaux atteints par les inondations antérieures, dans la mesure où on les connaît avec autant de précisions qu'en 1953; il semble que même l'invasion de 1925 n'ait pas dépassé la dernière. Si celle-ci s'était produite 15 jours plus tard, coïncidant ainsi avec la plus forte marée astronomique, le niveau maximal aurait été dépassé encore de 0,75 m.

(2) Le rapport final porte le n° 1.

Le vent aurait pu aggraver davantage le phénomène, si la dépression s'était retournée en sa course et si la tempête avait duré plus longtemps.

Tout compte fait, c'est la raison pour laquelle le niveau de 5 m sur NAP a été pris comme « base » de départ des cotes à faire entrer en ligne, soit 1,15 m de plus que celle de 1953. La probabilité d'un dépassement de cette cote de 5 m est de $1/10^4$.

A propos des niveaux à retenir, on fait remarquer qu'en dehors du « niveau de base », on est amené à considérer un « niveau de projet », qui en diffère plus ou moins selon le risque ou le degré de désastre que ferait courir à telle ou telle section de la côte un dépassement de l'un ou l'autre de ces niveaux. Car les hinterlands à protéger (urbains ou agricoles) n'ont pas tous la même valeur.

Le tableau des pages 30-31 donne les niveaux de base en chaque point du littoral ou des estuaires, leur relèvement par l'effet supposé des ouvrages (5 à 40 cm); l'abattement (0,30 à 0,60 m, sauf devant La Haye ou le Helder, où l'abattement est nul) qu'on fait subir à ces niveaux de base ainsi corrigés et augmentés pour déterminer les niveaux du projet, ainsi que le relèvement de ceux-ci par rapport aux plus forts niveaux atteints en 1953 ou les plus mauvaises années, soit 0,80 à 1,80 m selon les points (maximum au Helder).

Les chiffres afférents à chaque station sont discutés et justifiés ensuite (pp. 32 à 33).

Nous ne revenons pas sur le choix de la solution entre le confortement des digues existantes, et l'encercllement de l'ensemble des îles avec le barrage concomitant des grands bras de mer non intéressés par la grande navigation (pp. 33-35, voir aussi Conférence Académie de Marine, p. 11, *in fine*).

On s'est un instant arrêté au cas de la voie d'eau de Rotterdam, exutoire d'un immense trafic, pour se demander si on pouvait lui infliger un barrage de degré de fermeture variable contre les incursions de la mer.

C'est surtout la considération du temps nécessaire à une étude sérieuse de ce problème qui l'a fait écarter, au moins pour le moment. Il en résultera l'absence d'une seconde ligne de défense pour les terrains adjacents à cette voie d'eau dont il faudra consolider et surélever les digues bordières.

Même problème pour l'Escaut occidental et des divers bras de navigation Noord, Lek, Merwede, Vieille Meuse.

Les paragraphes suivants (pp. 37-38) expliquent pourquoi quelques barrages secondaires sont utiles en vue même de la construction des

barrages principaux du large, afin de réduire les surfaces s'écoulant par ceux-ci et les courants corrélatifs.

L'écoulement des glaces sera concentré sur les vannages appropriés du barrage du Haringvliet outre les exutoires de navigation laissés libres; mais il faudra laisser subsister pendant les hivers rigoureux un léger marnage ou mouvement, dans la nappe que ce barrage commande, par les ouvertures de celui-ci, afin d'éviter un trop fort blocage de la glace. Et encore, pour les périodes de hautes eaux de mer coïncidant avec de hautes eaux fluviales, faudra-t-il peut-être étudier une certaine conjugaison du Haringvliet et du bassin d'eau douce.

Un petit barrage à ouvertures mobiles dans la Vieille Meuse, à sa rencontre avec la rivière de Rotterdam, est rendu utile pour faciliter les périodes de basses eaux du Rhin, le report vers l'aval de la limite de la salure des eaux dans cette rivière.

Un barrage trop immuable serait controversé.

On renforcera et surélèvera de 1,50 à 2 m les digues le long des rivières non barrées et le long des rives d'aval non encloses dans les grands barrages principaux.

Le port de Dordrecht deviendra commandé par une écluse; mais il doit l'accepter et il aura, en compensation, une voie de sortie moins soumise aux courants.

Le barrage du Volkerak est un outil à deux tranchants; il peut défendre le réservoir du sud contre la contamination par le sol provenant de l'ouverture du barrage du Haringvliet pendant la glaciation. Mais son rôle est soumis à la question du meilleur niveau à donner aux diverses parties du réservoir d'eau douce.

Beaucoup d'autres considérations interviennent dans la détermination et dans le mode d'utilisation des divers barrages que seule permet d'apprécier une connaissance approfondie et prolongée des divers besoins nationaux.

On justifie ensuite (p. 40) :

- une écluse pour navires de mer dans l'Yssel hollandais, en correction du barrage de cette rivière;
- une petite écluse dans le barrage du Haringvliet, surtout pour le matériel de service, les besoins de la pêche, les sabliers, les caboteurs, mais non pour une navigation plus importante;
- une écluse dans la digue des Grevelingen pour les travaux du Brouwershavense Gat et pour la navigation des zones arrières;
- une écluse dans le Landkreek dam, prévue pour la navigation vers Walcheren et les petits ports d'amont et l'aménagement de la provision d'eau douce; un complexe d'éclu-

ses dans la digue du Volkerak, plus modeste que les écluses antérieures, lesquelles pourront être supprimées;

- une écluse dans la partie inférieure de la Vieille Meuse pour le trafic de Dordrecht et l'amont, écluse qui devra cependant pouvoir laisser passer les eaux de tempête;
- l'absence d'écluses dans les digues du Brouwershavensee Gat, l'Escaut oriental, le Veerse Gat, par où risqueraient de ne rentrer que du sel et du sable.

Du sel pénétrera bien par les écluses précitées; mais il sera plus facile à chasser.

Le paragraphe 5, 4, 2 (pp. 40-41) parle des routes de liaison interinsulaires avec le continent néerlandais et belge, de Rotterdam avec le Nord-Brabant et Anvers notamment.

Le paragraphe 5,4,3 est consacré au problème du transfert des parcs à huîtres et à moules, indésirables en maintes nappes d'eau devenues trop calmes ou trop douces. Le souci de l'eau douce et même celui des sports nautiques priment ces productions; il y a un espoir pour les moules dans la mer de Wadden, pas pour les huîtres. Ils représentent cependant à eux deux un chiffre d'affaires de 15 millions de florins. Par contre, on pourra créer une pêche d'eau douce (1 million de florins).

Toute idée d'utiliser le jeu de la marée aux barrages comme créatrice de force motrice a été écartée à cause notamment du faible marage.

Le paragraphe 55 (p. 42) donne une liste des 16 ordres de travaux à exécuter.

Pages 43-46, on examine les plus ou moins grandes difficultés d'exécution des divers ouvrages de fermeture, d'après les précédents néerlandais notamment. (tabl. p. 44).

Les plus hardis resteront les barrages du Brouwershavensee Gat, de l'Escaut oriental et du Veerse Gat.

On rappelle (p. 45) les divers procédés d'études mathématiques, par modèles hydraulique ou électrique qui se contrôleront l'un l'autre.

Une bonne connaissance des fonds permettra de répartir les premiers éléments de digues sur les bancs, les barrages seuils (groynes) dans les chenaux, puis de resserrer peu à peu les brèches subsistantes où se précipitent les plus grands courants et qui recouvriront souvent les barrages-seuils précités, avec le risque cependant de voir s'affouiller les fonds meubles, ce contre quoi on luttera par des revêtements de ces fonds aussi bien sur la pointe des bancs que dans les sillons; les modèles guident pour fixer le développement à donner à ces revêtements.

Les deux systèmes de fermeture employés ces dernières années ont été la précipitation de gros

blocs de béton, de sacs de sable ou d'argile à blocs, de sacs de sable en tissu plastique ou l'immersion de caissons accolés dans les courts instants du minimum de courant ou de différence accrue normalement par les premiers éléments des barrages.

Mais cette immersion de plusieurs caissons, qui doit être simultanée, n'est pas sans risque, et l'on préfère recourir à des caissons à larges ouvertures munies de vannes, selon une idée conçue déjà lors de la fermeture du Zuyderzee (De Boy et expérience de Walcheren en 1945-1946). Le courant ne s'amplifie pas trop après l'immersion de chaque caisson, et l'abaissement simultané des vannes est aisé.

Les deux méthodes pourraient d'ailleurs être employées. Mais l'argile à blocs fait défaut dans le voisinage du Delta et les courants y sont plus forts qu'au Zuyderzee; on y a substitué des matériaux provenant de la découverte des mines du Limbourg.

Toute fermeture de cette sorte doit être terminée en une saison, sans y laisser s'intercaler un hiver.

Le Comité ne s'est pas attardé aux détails de réalisation de ces fermetures qu'il a seulement tenues pour possibles (ce qui conditionne l'achèvement des digues de l'Escaut en aval du Brouwershavensee Gat).

Mais la protection du sol ne pourra plus continuer à être obtenue par des matelas de fascines, notamment parce que la quantité de branchages disponibles ne serait pas suffisante et que ces matelas ne se conserveraient pas assez longtemps.

Aux pages 45 à 55, on examine avec plus de détails les variations de niveau à prévoir dans la voie d'eau de Rotterdam, le Haringvliet, du fait des travaux du plan en cas de tempête au large, et soit en cas d'eaux d'amont normales, soit en cas de crues d'amont, tenues pour indépendantes des grandes marées-tempêtes.

Des tableaux (pp. 52 à 54) donnent les niveaux à prendre en compte pour les digues aval comme prévision après l'exécution des travaux du Delta, par comparaison avec les niveaux actuels, dans différentes combinaisons et en supposant notamment la Vieille Meuse ouverte.

Quant aux courants, ils ne seront pas sensiblement plus forts qu'actuellement dans les voies navigables, sauf dans les sections aval du Noord, de la Vieille Meuse par tempêtes et dans le Kil de Dordrecht au jusant, et cela, bien que les eaux fluviales doivent s'écouler surtout par la voie d'eau de Rotterdam après achèvement du plan et non plus par le Haringvliet, et un peu aussi par les écluses de ce dernier barrage.

Eaux douces. — Une carte de la page 56 figure la limite d'une salure supérieure à 300 milli-

grammes de chlore par litre à haute mer et basse mer, quand les afflux d'eau fluviale sont faibles.

Relevons entre autres indications :

Quand le Rhin débite au moins 2 000 m³ par seconde, la réserve d'eau douce, pour le pays de Delft, peut être alimentée; mais cela ne se produit guère que six mois par an en moyenne.

On compte sur 70 milliards de mètres cubes d'eau venant annuellement du Rhin, 8 milliards de la Meuse, 25 milliards de la pluie sur le sol hollandais (76 cm d'eau), ce qui, déduction faite des pertes par effluents et évaporation, et compte tenu du sel envahissant un pays aussi peu élevé, conduit à attribuer au Rhin l'alimentation essentielle du pays.

Mais il n'y a pas seulement à raisonner sur la quantité des eaux rhénanes, leur qualité importe aussi; or celle-ci s'aggrave peu à peu, par l'augmentation des produits chlorés venant des industries de la Ruhr et de l'Alsace (doublement au moins depuis 1936 : 35 kg par seconde en 1880, 255 kg en 1960) et d'autres matières organiques et inorganiques.

Le problème de la pollution croissante des eaux du Rhin est porté sur le plan international (Commission pour la protection du Rhin contre les pollutions). Les autorités néerlandaises doivent être vigilantes. On peut concevoir des réservoirs, ouverts ou souterrains, où s'accumuleraient les eaux pendant les périodes où elles sont abondantes et faiblement polluées. Les exemples du lac d'Yssel (ancien Zuyderzee) et de la Meuse de Brielle sont invoqués. Le côté de la pollution radioactive n'est pas oublié.

Quoi qu'il en soit, on ne garantit nullement de pouvoir tenir en permanence la limite idéale de teneur en sel de 300 mg de Cl par litre (p. 61). Il faudra plusieurs années pour dessaler le lac Zélandais et le Haringvliet, celui-ci en premier lieu et cela, par l'eau des rivières (sauf, jusqu'à nouvel ordre, l'Escaut occidental).

Pour éviter au début trop de rentrées d'eau salée, on ne se servira pas (on ne construira pas) des écluses dans les trois barrages du sud, et l'on prendra des précautions pour ne pas exagérer celles des ports de Flessingue et Hansweert, sans quoi il faudrait dépenser beaucoup plus d'eau douce pour dessaler.

Au contraire, il y aura des écluses dans le barrage du Haringvliet, qui contribueront au dessalage. Il ne faut pas oublier cependant que l'Haringvliet est en communication avec la mer par les bras le reliant aux voies d'eau de Rotterdam, approvisionneurs d'eau douce par ailleurs, ni que le barrage doit être ouvert de temps en temps pendant les gros hivers pour réduire les formations de glace.

Il en restera longtemps une couche salée sur les fonds, mais on s'en accommodera.

On s'efforcera de ne pas se laisser entraîner à gaspiller trop de volume d'eau douce pour des fins populaires, telles que la création de surfaces cultivables, de sports nautiques, ou de nouveaux parcs à coquillages.

Le réglage du niveau du lac Zélandais sera une œuvre progressive et lente, faite de tâtonnements.

La question de la fermeture ou de la non fermeture de la Vieille Meuse se résoudra selon qu'on voudra ou non accroître les effets du Plan Delta; la proportion de chlore diminuera environ de moitié avec la fermeture de la Vieille Meuse (tabl. p. 63); le Comité penche à conseiller cette fermeture en période de basses eaux fluviales; la Vieille Meuse est réputée très chargée d'apports.

On pourra jouer aussi sur la part prise par les autres exutoires du Rhin pour favoriser l'arrivée d'eau douce.

Quatre cas sont examinés (pp. 66 à 68) selon l'abondance de l'apport du Rhin.

Le rapport examine ensuite la situation hydraulique avec un niveau normal de la mer, les niveaux, les courants, dans les divers bras, le cas des périodes de glaciation, les mouvements de sable dans les chenaux et le long du littoral.

Il parle (p. 74) des possibilités de création de nouveaux polders et de plaisirs nautiques.

Le paragraphe (p. 75) relatif à l'emplacement des divers barrages n'apporte pas encore de précision très grande, sauf pour celui de l'Yssel hollandais, indépendant de l'action de la mer, car c'est la distance à celle-ci qui est principalement tenue en suspens par crainte des houles retardatrices des chantiers; le problème est surtout traité par considérations générales.

L'ordre des travaux (p. 77) est d'abord conditionné par le désir d'apporter le plus tôt possible le maximum de sécurité complémentaire, aussi par l'opportunité de conduire les travaux les plus difficiles avec l'expérience des plus faciles.

A ces titres, le barrage de l'Yssel hollandais se présentait d'abord comme un des plus indiqués.

Puis ce serait le barrage du Veerse Gat, à cause de ses faibles dimensions; il doit être lié avec celui du Zandkreek pour éviter des courants excessifs lors de la fermeture du Veerse Gat.

Ce premier groupe augmenterait déjà la sécurité dans la région, et une communication fixe serait obtenue entre l'île de Noord Beveland, d'une part, Walcheren et Zuid-Beveland, d'autre part.

C'est la progression la plus rapide de la sécurité qui guidera pour l'ordre à adopter dans les trois autres grands barrages extérieurs de Haringvliet, Brouwershavensee, Escaut oriental.

A cet égard, c'est le Haringvliet, le plus septentrional, qui sera choisi parce qu'il entraînera déjà un notable abaissement du niveau créé par une marée-tempête (0,55 m à Willemstad pour celle de 1953, par exemple, et un peu moins dans les voies navigables de Rotterdam) parce que, grâce à ses écluses, la construction de ce barrage sera facilitée en ce qui concerne les courants et ne troublera pas trop la situation antérieure, parce qu'il se présente comme un ouvrage un peu moins difficile que les deux autres auxquels il servira de ballon d'essai, parce qu'enfin il assurera, avec la fermeture concomitante du Volkerak, une première étape pour la constitution du grand réservoir d'eau douce, laquelle serait illusoire après la fermeture du Brouwershavensee Gat si le Haringvliet n'était pas déjà clos.

Mais à la réflexion, le moment optimal de la fermeture du Volkerak prête à hésitation de la part du Comité (à cause des points de vue du coût des travaux, de la navigation, de l'eau douce, des cultures de coquillages, de la sécurité, etc.) qui renvoie à plus tard la décision à prendre par le Gouvernement.

Avec ces deux barrages (Haringvliet, Volkerak), on peut entreprendre, sans attendre leur achèvement, le barrage des Grevelingen, indispensable pour réduire les courants et le niveau aux deux derniers grands barrages extérieurs du Brouwershavensee Gat et de l'Escaut oriental (voir p. 37), car l'une des vidanges se répercuterait sur l'autre issue en cas de bouchure partielle de l'une d'elles; la navigation serait entravée par l'accroissement des courants et l'emplacement de ce barrage secondaire des Grevelingen est commandé par le fait qu'il n'est pas désirable d'obturer les passes entre l'île de Duiveland et la presqu'île de Sint Philippe.

Cette digue des Grevelingen peut même s'achever en même temps que celle du Haringvliet.

Mais les défenses côtières des îles en aval du barrage des Grevelingen doivent être renforcées dans toute la période intermédiaire jusqu'à la construction du Brouwershavensee Gat.

On pourra prendre ensuite en considération le barrage de la Vieille Meuse, celui des bras du Bierbos, etc.

Un diagramme (p. 78) montre que, dans une tempête comme celle de 1953, avec des débits de 1 600 m³ du Rhin, de 210 m³ de la Meuse, le niveau à Willemstad, point le plus sensible, aurait été abaissé jusqu'à 2,35 m si le Haringvliet et le Volkerak avaient été obturés, et de 53 cm si le premier seul l'avait été, cet abaissement se réduisant à 0,35 m vers Rotterdam.

La situation au sud du Volkerak ne sera pas améliorée tant que l'Escaut oriental n'aura pas été barré.

Ce barrage aurait procuré plus rapidement une atténuation de l'agitation jusqu'à la région

du Volkerak (sauf entre le Brouwershavensee Gat et les Grevelingen) et, plus vite, un réservoir d'eau de plus en plus douce conforme au principe initial de créer avant tout le maximum de sécurité; mais d'autres considérations interviennent en sens inverse, telles que la facilité plus grande de barrer le Brouwershavensee Gat (plus court que l'autre), le report à une date plus reculée de la suppression de la culture des coquillages en ces parages, et finalement le Comité, obligé de se prononcer tout de suite, ne serait-ce que pour le renforcement des défenses dans les Grevelingen, opte pour mettre le barrage de l'Escaut oriental au dernier rang chronologique.

Le barrage de la Vieille Meuse, près de son débouché aval, n'est pas intéressant à une époque rapprochée (avant les autres clôtures).

On gagnera le temps de mieux calculer les débouchés éclusés, dans le Volkerak notamment.

Renforcement des digues existantes et construction de nouvelles défenses côtières. — C'est ensuite aux défenses de berges à renforcer qu'il faudra songer; ce sont de plus menus travaux, faciles à diviser et à confier à de petites entreprises.

Il conviendra de commencer — et très vite — par les digues protégeant le triangle vital de la Hollande, c'est-à-dire la rive nord de la voie d'eau de Rotterdam, les bords des rivières en communication ouverte avec elle, la côte entre Hoek van Holland et Ymuiden, puis les rives des îles ou du continent situées en aval des futures digues du large.

Les idées qui ont présidé à la conception des anciennes défenses ont été multiples et non uniques; les unes étaient plus mauvaises que les autres. Il est bon de les unifier sur un plan national et de les améliorer encore.

Les niveaux à respecter ont déjà été définis.

La protection étanche de la crête et du flanc intérieur des digues doit être revue aussi. Il est arrivé que le sol ait baissé devant les digues; les vents, fauteurs des vagues, ont pu augmenter sur les prévisions d'origine.

Quelques conseils sont donnés pour la consistance des digues, quelques observations préliminaires sur les facteurs de leur destruction.

L'influence des grains, des à-coups des rafales sont traités aux pages 82-83, avec les oscillations de 15 à 45 minutes qu'ils peuvent infliger au plan d'eau, se répercutant en seiches dans les surfaces d'eau des ports, et cela, jusqu'à 0,50 m ou plus.

Une certaine subsidence du sol doit entrer en compte à longue échéance; elle se confond plus ou moins avec le tassement lent des couches meubles sur le niveau desquelles avaient été pris les zéros du départ. Le tassement propre des digues jeunes, le tassement lent des vieilles

digues (qui a pu atteindre 1 m en un siècle), ne doivent pas être négligés; ils sont très variables avec les lieux. (Voir aussi conférence à l'Académie de Marine, p. 12, 2^e alinéa et 3^e contribution ci-après du volume 6.) On peut recourir à la méthode du carbone 14 pour déterminer les couches qui, émergentes autrefois, sont, aujourd'hui, enfouies en profondeur.

Des conseils de détail sont donnés (pp. 84 et 85) pour la détermination du niveau de la crête des digues en additionnant les effets du niveau normal maximal de l'eau, du plus grand dépassement possible de celui-ci, des grains ou rafales, de la subsidence, du tassement de la défense entre deux périodes de correction; puis pour l'exécution du renforcement, mettant de côté la carapace de couverture étanche.

Des conseils sont donnés ensuite pour la constitution même des digues: nature (herbe, asphalte) et pente du revêtement étanche (1/3 de pente au plus), sous-pressions à éviter, berme un peu au-dessus du niveau d'attaque moyen pour renforcer la face extérieure: protection de celle-ci par pierraille ou blocs et pente convenable.

Des notices spéciales, rappelées en bibliographie, traitent de ces divers points.

Les recommandations ci-dessus ne s'appliquent pas au cas des plages longées par un boulevard de promenade.

Un paragraphe (p. 87) a trait aux défenses actuelles par les dunes, dont le pied peut reculer parfois sous l'action de la mer (20 à 30 m en 1953) quand la plage n'est pas en équilibre; cet équilibre se constate souvent en Hollande quand la pente de l'estran est de l'ordre du 1/50^e et l'intervalle entre la laisse de haute mer et le pied de la dune est de 50 m.

Il faut éviter de prélever trop de sable sur une dune en équilibre pour protéger des sections voisines plus faibles.

Si cette distance de protection n'est pas suffisante, il faut recourir à des épis.

Si la dune est en équilibre, quelques bandes ou touffes d'herbes assez larges peuvent suffire pour résister aux attaques de la mer, et, s'il y a quelques érosions, on peut admettre que le sable enlevé ira plus loin combler des anfractuosités.

Si ces conditions ne sont pas remplies, il faut défendre le pied des dunes, et cette défense de pied doit être adaptée par sa pente à celle de la dune, partir de bas, être capable de résister aux assauts de la vague (exemples à prendre pour les Services français). Si cela ne suffit pas, il faut en venir à une véritable digue submergée.

Suivent (pp. 88-89) quelques conseils pour le vannage des écluses, pour la liaison des nouveaux ouvrages avec les autres et les digues primaires, les points bas entre la ligne des dunes, dont on peut admettre qu'on peut les lais-

ser franchir par les vagues s'il sont à un niveau assez élevé et sont susceptibles d'être assez vite barrés.

Il faut éviter, dans ces ouvrages neufs, toute construction, tous pieux, rails, arbres, racines, câbles, canalisation, tous objets donnant lieu à des fouilles. Mieux vaut siphonner pour franchir une ligne de dunes. Les arbres et racines ont joué un rôle néfaste dans le désastre de 1953.

✱

Des défenses intérieures supplémentaires (p. 89 et sq.) peuvent être utilisées ou créées; il existe tout un système de digues anciennes, parfois de première ligne, mais aussi le long des rivières; elles sont souvent affaiblies, écrêtées, mal reliées entre elles pour former une défense continue. S'il n'en coûte pas trop de les remettre en état, de les compléter, il faut les enrégimenter dans un système secondaire.

On a recommandé, dès le début, la surélévation des digues de Schouwen entre cette île et Duiveland, pour empêcher les inondations de l'une des îles de se réunir avec l'autre, car cela a retardé l'expulsion de l'eau de mer au-delà de l'hiver. Cette séparation peut fonctionner comme seconde ligne de défense et de telles secondes lignes (digues vertes) voient le niveau monter devant elles d'autant plus vite que l'intervalle entre les deux lignes est plus faible, et si elles crèvent à leur tour, les populations agglomérées, qui se croyaient protégées, sont d'autant plus fâcheusement surprises. Les facilités plus ou moins grandes de réparer leurs brèches doivent entrer en compte dans le plan de ces défenses secondaires.

Ces digues doivent, comme les autres, être dépourvues de toute végétation pénétrante et être un peu pentées. Si on n'en établit pas, qu'on sache au moins qu'en cas d'inondation soudaine, elles auraient pu servir au sauvetage des populations, et du bétail et servir d'embase à des séparations dans les surfaces inondées.

✱

Le rapport passe en revue les diverses régions des Pays-Bas au point de vue de leurs risques actuels ou futurs de se voir inondées.

Tandis que le nord de la province de Hollande, au nord du canal d'Amsterdam à la mer du Nord, puis les polders du Zuyderzee (à cause de leur forte division) puis l'île d'Overflakkee (bien compartimentée), puis une bonne partie de la Zélande après exécution du plan, sont mieux garanties à cet égard, on craint encore pour la région d'Utrecht. Les points menacés à renforcer sont signalés dans les digues fluviales, dont certaines (Yssel hollandais) doivent pou-

voir résister à des afflux de l'un ou l'autre sens.

Le Comité (p. 92) s'est préoccupé des mesures d'organisation préalables à prendre pour réduire les pertes de vie par l'inondation : mobilisation de la population civile en liaison avec l'armée, avertissements, constructions de refuges solides et élevés çà et là, ou constructions déjà existantes et adaptées; plantations d'arbres-guides le long des routes de retraite. C'est près des brèches où le flot arrive vite que les pertes de richesse sont les plus importantes.

Organisation de l'entretien des ouvrages. — Naguère confiée à un trop grand nombre d'organismes locaux, cette surveillance des ouvrages ne doit pas être non plus le lot exclusif d'une Administration publique, mais il est suggéré de prévoir la constitution d'un nombre restreint de « boards » ou de « conseils des eaux » à juridiction étendue, pourvus d'assez bons moyens, ce qui est ainsi possible. On sait déjà à quoi ils devront veiller, et le Comité attire leur attention sur la convenance de ne pas négliger les herbes des dunes, leurs coupes, leur restauration.

Il faut au contraire renvoyer à une Administration publique l'entretien des gros ouvrages de protection, des ouvrages portuaires, et lui rattacher certains entretiens routiers qui ressortissent encore d'administrations municipales ou d'offices des eaux. (Voir conférence à l'Académie de Marine, dernier alinéa, pp. 18 et 19.)

Il faut en tous cas créer un lien entre les divers organismes responsables. Il faut des techniciens de plus en plus avertis auprès d'eux, à cause des techniques spéciales qui se sont révélées de plus en plus importantes, telles que les propriétés et réactions du sol, variables avec les régions.

Le Comité rappelle le rôle constitutionnel de la Couronne, pour la conservation des digues et la sécurité du pays. Ses propositions doivent être considérées comme un tout.

Mais il conseille modestement de remettre à des spécialistes plus autorisés l'étude de détail des faces complémentaires du vaste problème, telles que la navigation, les ports, les développements urbains, ceux des zones industrielles, des sports, etc.



Volumes 2 à 6. — Les cinq autres volumes sont détaillés respectivement dans la préface du second :

- apport-contribution de l'Institut royal de Météorologie des Pays-Bas sur les vagues de tempête;
- apport du Centre Mathématique sur les vagues de tempête;

- apport du Rijkswaterstaat sur les vagues de tempête et le jeu des marées;
- apport du Professeur Th. Thijsse et du Rijkswaterstaat sur les conceptions du plan Delta et les conséquences de ce travail (modèles réduits, influence des barrages sur les niveaux d'eau, glaces, mouvements de sables);
- apport du Rijkswaterstaat, du Laboratoire d'Hydraulique et du Groupe de travail chargé d'examiner la répartition des efforts dans les digues à la mer, y compris les recherches sur l'importance de l'échelonnement des barrages et des digues. Apport du professeur J. Tinbergen sur la balance économique du Plan Delta (3).

Un sommaire de chacune de ces parties est fourni dans le volume 1 qui contient, bien entendu, en tête la composition de la Commission du Plan et des buts qui lui ont été assignés.

Celle-ci n'assume pas la responsabilité des apports précités, sauf pour ce qu'elle en a retenu dans son rapport final; elle fournit une liste détaillée de leurs auteurs à la fin du premier volume.



VOLUME 2

Il est entièrement consacré aux *phénomènes météorologiques*.

Il analyse les situations barométriques qui ont déterminé la tempête de janvier-février 1953. C'est une dépression qui s'est déplacée d'abord vers l'est, puis vers le sud-est, et qui était comprimée sur son flanc ouest par de hautes pressions se renforçant progressivement et cheminant du méridien du Sud-Groenland à l'Irlande. Il est résulté de ce resserrement des isobares un très fort gradient qui a engendré un vent de 130 km/h. En outre, dans son déplacement lent vers le sud-est, la dépression a maintenu ses isobares occidentales dans la même direction, en sorte que les vents ont pu souffler longtemps selon le même sens, ce qui est un facteur de très grosse mer.

Nous remarquons toutefois que la vitesse du vent enregistrée à Ymuiden (28 m/s) n'a rien

(3) Un premier volume avait paru en 1961, *Verlag over de Stormloed* (Rapport sur les marées tempêtes) avec 714 pages; il était surtout descriptif du phénomène et a dû être réincorporé en partie dans la série des six volumes suivants. On y note en particulier (p. 37) une distribution des tempêtes passées selon les parallaxes de la lune et le fait qu'à tout moment et en toutes circonstances, le cas de 1953 a été plus violent. Il semble aussi que la continuité du vent dans la même direction durant plusieurs jours, en raison de la configuration des isobares, ait aidé à développer le phénomène.

d'exceptionnel (200 km/h dans la zone des Roaring Forties et bien plus encore dans le sud de l'océan Indien).

L'ouvrage essaie de traiter par le calcul l'évolution des surfaces isobariques et de déduire la vitesse du vent de l'échelonnement des pressions, faute de points d'observation en nombre suffisant, notamment sur la côte des îles Britanniques.

Une incitation à les y multiplier se lit même entre les lignes; on ne peut savoir si cet appel sera entendu et satisfait.

(Nous avons regretté nous-mêmes de n'avoir pas de statistiques assez anciennes sur la fréquence et la force de ces tempêtes pour tenter une explication de l'érosion croissante de nos rivages.)

Une autre famille de tempêtes (21-24 décembre 1954) est analysée: elle consiste en deux dépressions « confluentes » qui ont déterminé des vents de 145 km/h au Helder; mais leur trajectoire était distante de plus de 225 km des Pays-Bas, en sorte que les effets y ont été moins sensibles.

Ceci pour suggérer qu'on se trouve, heureusement rarement, en but aux phénomènes maximaux, mais que, s'il en était ainsi, les dommages à escompter seraient infiniment plus graves; et on doit les supputer, ne serait-ce que pour le calcul de la cote d'arasement des nouvelles digues et barrages primaires. C'est ainsi qu'en transposant certaines situations isobariques portées à l'extrême connu, on arriverait à croire possible une surélévation du niveau de l'eau par l'effet du vent atteignant jusqu'à 6,50 m; en tous cas, le chiffre de 5 m est plus probable (à rapprocher des surélévations, supérieures à 3 m, des estuaires de la Weser et de l'Elbe, ou du delta très plat du Gange).

Une digression étudie un effet de résonance créé par deux tempêtes successives (p. 177) et l'effet du vent sur le Waddense hollandais (entre l'archipel frison et la côte, p. 188) combiné avec un effet de mer du Nord.



VOLUME 3

Le troisième volume contient les apports de cinq organismes d'études spéciaux concernant :

La transgression des niveaux maximaux de la mer à Hoek van Holland par des tempêtes sélectionnées;

Les décisions pour la protection des Pays-Bas, du point de vue économique;

L'indépendance des marées hautes à Hoek van Holland et les débits du Rhin à Lobith;

L'étude mathématique de l'influence des vents sur les niveaux en mer du Nord;

Les oscillations libres d'un fluide dans un bassin rectangulaire en rotation.

Sujets très divers, on le voit, dont les réflexions qu'ils suggèrent devraient être données dans les résumés analysés ci-dessous :

On en retire seulement avec quelque facilité que la probabilité d'un dépassement du niveau théorique des hautes mers revêt la forme d'une ligne droite descendante (quand l'échelle horizontale des dépassements est arithmétique, celle des pourcentages de dépassement logarithmique); que cette probabilité est de l'ordre de $1/100^e$ pour un dépassement de l'ordre de 3 m, et serait de l'ordre de 10^{-7} pour un dépassement, jamais constaté, de 6 m, et cela, d'après des observations relevées pendant soixante-dix ans.

On notera avec intérêt que la probabilité de la marée de février 1953 (NAP + 3,85 m) est de 0,0045.



Une dissertation d'ordre économique s'imposait, portant sur la valeur des pertes en argent à escompter en cas de dépassement, par une marée tempête, du niveau des digues, sur le prix de celles-ci selon leur surélévation et sur la probabilité d'un niveau déterminé.

Il n'apparaît pas de chiffre, de tableau ou de formule traduisant le jeu de ces triples données. Mais il est explicite que la surélévation des digues qui réduirait de moitié la probabilité de dépassement est de l'ordre de 0,23 m; celle qui la réduirait au $1/10^e$ est de l'ordre de 0,78 m.



La question a été soulevée d'une augmentation de la sécurité (ou d'une répartition des risques) par un compartimentage étanche; mais c'est un peu un retour au système actuel des endiguages individuels de chaque île par rapport à un endiguement périphérique de l'archipel.



Revenant à ces travaux qui pourraient être plus mathématiques et ressortir davantage à l'hydraulique que le précédent, on rencontre un compte rendu des mesures faites sur deux années (1950-1952) du débit en hautes eaux du Rhin à Lobith (à l'entrée du Rhin en Gueldre P.B.) et du niveau imposé à ce fleuve par les hautes mers à Hoek. On a trouvé qu'il n'y avait pas de dépendance entre ces deux séries de chiffres.



Etude mathématique de l'influence des vents sur les niveaux des eaux de la mer du Nord. — Le problème a évidemment une face météoro-

logique et une face hydrodynamique; celle-ci a été étudiée par la section de mathématiques appliquées du Centre mathématique d'Amsterdam.

Des simplifications sont apportées pour permettre le calcul : la composante verticale de la vitesse est négligée, les équations sont rendues linéaires; le coefficient de Coriolis, dont on a reconnu qu'on ne pouvait le négliger, est supposé constant; la forme de la côte est prise rectiligne; les variations secondes de profondeur sont négligées et prises pour régulières de 33 m à 158 m, avec 65 m comme moyenne harmonique.

La mer du Nord est assimilée à un rectangle à côté supérieur ouvert sur l'Océan; l'ouverture sur la Manche est d'abord supprimée; on en tiendra compte plus tard, par un calcul spécial, si l'on peut.

Moyennant ces simplifications reconnues admissibles, le problème se ramène à une « équation différentielle elliptique partielle, avec des conditions aux limites obliques ». Ce problème n'est pas encore complètement soluble.

On étudie successivement le cas d'une zone de vent non stationnaire, puis d'une zone de vent stationnaire non uniforme.

L'influence de la rotation de la terre, négligeable pour l'élévation du niveau de la mer sur la côte sud par vent du nord, est assez importante par vent soufflant de l'ouest, de plus en plus importante à mesure qu'on s'avance dans le nord; la direction du vent la plus défavorable au regard de l'élévation est à 345°.

Des figures donnent l'élévation au milieu de la côte sud pour un vent exprimé par une formule contenant un terme exponentiel.

On examine aussi le cas d'une tempête survenant brusquement; l'élévation s'accroît alors rapidement.

✱

On étudie enfin (p. 195) le cas d'oscillations libres dans un bassin rectangulaire animé d'une rotation : si celle-ci est supposée assez lente, ce qui n'est pas tout à fait le cas en mer du Nord, la plus longue période d'oscillation propre décroît (avec une rotation croissante?); mais elle croîtrait s'il s'agissait d'un lac fermé.

✱

VOLUME 4

Considérations sur les marées-tempêtes dans le cycle des marées. — Ce sont d'abord les niveaux atteints par la marée tempête du 1^{er} février 1953 sur les côtes des Pays-Bas dont il s'agit; puis on parle de l'influence respective de

la marée astronomique et des débits fluviaux, des niveaux résultants comparés à ceux des marées-tempêtes antérieures, de la fréquence de leur dépassement sur la moyenne.

On a essayé de permettre une description de l'onde de tempête en provoquant un « effet de tempête ».

On remarquera en particulier (p. 12) un intéressant schéma circulaire axé sur les phases de la Lune, faisant ressortir la coïncidence plus ou moins grande des fortes marées avec certaines de ces phases. Il semble qu'il y ait raréfaction autour du dernier quartier, concentration autour des pleines et nouvelles lunes. On sait que c'est un sujet souvent controversé; mais on ne peut nier que les effets des gros coups de vent, s'ils ne sont pas forcément plus fréquents à l'époque des grandes marées, sont plus spectaculaires quand ils coïncident avec les couches d'eau les plus épaisses et les courants les plus violents des vives eaux et des syzygies.

A la suite d'observations continuées pendant un siècle et demi, on a tracé les courbes de fréquence des très hautes marées et souligné leurs particularités, dans les estuaires notamment.

La fréquence des dépassements de la cote du 1^{er} février 1953 est traduite par une courbe de la page 77 (vol. 4) pour les 400 km du développement de la côte néerlandaise.

On ne se bornera plus (p. 91) à donner un coup de pouce aux plus fortes marées observées pour déterminer l'arasement des digues; mais on se réglera sur le résultat d'un calcul de probabilités des marées-tempêtes et de leur fréquence. On ne veut plus admettre un risque supérieur à 1 % dans les atteintes possibles du domaine public, si l'on peut être un peu plus audacieux pour les terrains particuliers.

La défense contre la mer étant, par voie de décentralisation, dévolue aux autorités locales, on avertit celles-ci des fortes tempêtes menaçant une côte, ainsi que les services d'assistance; l'organisation de ce service d'alarme est décrite.

Par le fait que ces diverses études partielles ont été confiées au même auteur, M. WEMELSFERDER, elles se trouvent groupées sans autre rapport mutuel.

C'est ainsi qu'à partir de la page 118 sont indiquées les précautions supplémentaires à prendre dans la fixation de l'arasement des digues, du fait qu'à la marée proprement dite et au vent moyen surélevant la mer, doit être ajouté le double effet des vagues courantes et des rafales, bourrasques ou grains amenant des trains de houle d'ordre supérieur (jusqu'à 0,60 m) pendant une durée ne dépassant guère une heure.

Nous abandonnons momentanément le volume 4 pour y revenir un peu plus tard.

*
VOLUME 6

La première partie de ce volume procède des données connues sur la hauteur des vagues pour en déduire, en suite d'observations, de calculs ou de modèles, (compte tenu aussi des risbermes intercalées) *l'étendue possible des projections de vagues*, point très important pour des digues qui ne devraient pas être « coiffées » ; mais les efforts locaux et instantanés sur le parement de ces ouvrages doivent être également appréciés, les études correspondantes sont encore inachevées ; elles gagneraient, le moment venu, à être rapprochées de celles qui ont été conduites en 1961 au laboratoire de la SOGREAH à Grenoble.

On observera, en particulier, le diagramme dépliant, intercalé après la page 21, qui rapproche les hauteurs de lame en rapport avec la vitesse du vent en mètres/seconde, la période des ondulations et (en échelle logarithmique) le temps en heures des phénomènes, ainsi que l'espace en kilomètres parcouru par lesdites ondulations.

D'autres diagrammes suivent celui-ci.

*
La deuxième contribution, apportée sous la présidence de M. JANSEN, ancien Directeur général du Rijkswaterstaat, traite de la répartition des efforts dans les diverses parties des digues à talus (à l'aide de modèles en matériau déformable, en matériau granuleux), ainsi que de la recherche du point de rupture.

On en a déduit :

- que dans une certaine mesure, la digue malléable s'adapte aux efforts subis ;
- que les destructions de 1953 ont été dues surtout au déversement des lames par-dessus la crête des digues et au défaut d'imperméabilité de leur talus intérieur près de son sommet, tel que l'eau a pénétré dans le corps de la digue et produit des ravages dont la forme peut être prédéterminée maintenant par une méthode graphique.

*
La troisième contribution est relative aux diverses causes d'affaissement des digues dans les Pays-Bas, savoir la subsidence du sol rocheux ou celle de la couche pléistocène, ou celle du rivage même, l'abaissement du zéro du nivellement, l'abaissement du couronnement des digues, de leur masse.

La première cause peut être de l'ordre de

0,20 m par siècle, la seconde de 0,25 m ; les autres peuvent atteindre 0,70 m par rapport au niveau moyen de la mer (qui s'est relevé de 0,07 m depuis le début du siècle par fonte des glaces arctiques).

Mais, autant qu'on peut juger sur des repères établis trop superficiellement, certaines digues se sont affaissées de 1 m à 1,80 m.

Un tableau (p. 56) chiffre jusqu'à 3,5 cm à 4 cm l'abaissement de certaines digues de Hollande du sud et jusqu'à 5 cm au Waalhaven, bassin de Rotterdam, et cela pendant 10 à 15 années récentes.

D'où l'on en vient à recommander une marge de sécurité de 0,20 m au moins par-delà les données les plus pessimistes.

*
Il faut se rendre compte (p. 134 du volume 4 auquel nous revenons un peu) des conséquences des barrages opposés au cheminement des ondes de marées sur le niveau de celles-ci. On dispose, pour ce faire, de trois méthodes : du calcul mathématique, du modèle hydraulique, du modèle ou de l'analogie hydraulique.

Les caractères particuliers de chacune de ces méthodes sont indiqués avec leurs moyens pratiques de réalisation et les restrictions auxquelles elles donnent lieu.

Leur orchestration figure dans l'apport 1116.

On remarque que le modèle hydraulique, le plus coûteux à installer, peut servir à analyser plusieurs variantes ou systèmes.

La précision de chacun est supérieure à celle de l'observation simple dans la nature, et il n'est pas défendu d'en employer concurremment deux, ou même les trois en coordination, pour lever un doute particulièrement angoissant.

*
Les méthodes de calcul à employer sont résumées pages 148 et suivantes (vol. 4). On rappelle les apports partiels et antérieurs de différents hydrauliciens calculateurs.

On expose des relations entre les calculs des marées et les déductions à tirer des recherches sur modèles hydrauliques et électriques.

On fait ressortir l'importance de tels calculs pour la détermination des écluses d'évacuation, des vitesses qui se produiront lors de chaque fermeture du barrage, de celles à ne pas outrepasser après exécution du plan dans les nombreux chenaux navigables, en vue de leur entretien et de leur utilisation.

La méthode harmonique, l'emploi des polynômes de Tschebycheff n'ont pas été oubliés.

On a été encouragé dans cette entreprise plus complexe par le succès des prévisions relatives à la fermeture beaucoup plus simple du seul

Zuyderzee pour les courants et le marnage en mer de Wadden.

Les faibles profondeurs régnant dans la zone intéressée et les bras des estuaires sont, d'une manière générale, une cause de l'importance à attribuer aux frottements et une source de distorsion, dans les modèles notamment.

*
**

Plusieurs apports supplémentaires dus à d'autres auteurs sont indiqués page 212 (vol. 4). Ils se rapportent aux conditions d'application du calcul et des modèles par analogie avec les problèmes des marées dans le Delta, à l'emploi d'une nouvelle machine dite « Deltare », aux lois des échelles en modèles.

*
**

VOLUME 5

Le volume 5, le plus gros de tous, rassemble encore six études assez indépendantes les unes des autres et présente de nombreux diagrammes et plans qui seraient à examiner en détail (après traduction des légendes et coordonnées).

*
**

La première à laquelle on devait s'attendre, dès l'origine, de la part d'un pays dont le Laboratoire d'hydraulique est universellement connu, est relative aux essais sur modèle effectués à Delft pour la zone du Delta.

Bien que ce ne soit pas indiqué dans le résumé, il semble que l'échelle et la distorsion retenues, par comparaison avec celles du Mississippi (Vicksburg), soit de 1/64 pour les profondeurs (à cause de la facilité d'extraire de ce rapport une racine ronde pour les vitesses) et 35 à 50 selon les époques comme rapport des réductions en plan.

On ne cherche pas à étudier d'abord les mouvements de matériaux : les parois du modèle sont donc inaffouillables. Mais on tient compte de la rotation de la Terre par un jeu de cylindres tournant. On n'a pas représenté la force tangentielle du vent, mais on en tient compte numériquement.

L'effet de frottement a été représenté par des tiges métalliques.

La précision des mesures de niveau est de l'ordre de 5 à 10 centimètres.

*
**

La deuxième étude, très importante et également attendue, concerne l'influence des travaux du Delta sur les marées et leurs niveaux par tempête sur cette côte.

Les calculs y sont nombreux et ne contiennent pas moins d'une soixantaine d'équations numérotées.

Les préoccupations sont de deux ordres différents :

La réduction des courants transversaux à la côte par suite de la fermeture d'un certain nombre de bras, rendra prépondérants les courants de marées longitudinaux, et des érosions littorales pourront en résulter qui nécessiteront des travaux de défenses côtières (pour lesquels nous n'avons pas l'inquiétude de voir la longue expérience de nos collègues hollandais inégale aux nécessités de la tâche).

La complexité actuelle des courants dans le Delta et près de la côte est extrême, vu le grand nombre de bras, la différence des phases des marées du large et des phases des estuaires.

Il faut cependant surmonter les difficultés de la transposition, vu l'intérêt vital de définir les nouvelles cotes des digues et des barrages.

On a schématisé en réduisant l'espace étudié à des bandes de 20 à 40 kilomètres de largeur, en agrandissant l'échelle de l'étude autour de l'île de Walcheren (séparant l'Escaut oriental destiné à mourir, de l'Escaut occidental, accès primordial des ports belges d'Anvers et de Gand).

On indique les modes de mesure sur place employés (appareils indicateurs de pression, de mesure de vitesses), on remarquera l'utilisation curieuse d'un ancien tube abandonné à travers l'Escaut comme niveau d'eau.

On donne un aperçu de ces calculs.

On en dégage la conviction que la fermeture de l'Escaut oriental n'influera pour ainsi dire pas sur l'Escaut occidental, si ce n'est par une différence de quelques centimètres dans les niveaux extrêmes et une diminution du niveau de la HM (qui aurait inquiété naguère les responsables des estuaires navigables).

Les barrages feront monter la mer de 20 centimètres de plus et l'abaisseront d'un peu moins.

Les courants se réduiront de 30 % dans les embouchures extérieures des estuaires barrés, ce qui est compréhensible.

Une marée-tempête comme celle du 1^{er} février 1953 pourrait faire monter le niveau devant un barrage de fermeture, de 0,50 m de plus.

*
**

Le même auteur, M. DRONKERS, approfondit les mêmes sujets dans une autre étude résumée en français pages 96 et suivantes (Vol. 5).

Mais il explique aussi pourquoi il a fallu diviser en deux parties la nappe d'eau douce ou adoucie : celle du sud complètement isolée entre le barrage extérieur étanche de l'Escaut oriental et le barrage intérieur du Volkerak; celle du

nord pouvant encore communiquer avec la mer par les écluses (5 300 m²) du barrage du Haringvliet, écluses qui seront manœuvrées à la demande des débits fluviaux du Rhin ou de la Meuse et des courants à ménager (pour la navigation et la conservation des berges et du fond) dans les bras du nord restant navigables.

C'est l'abaissement naturel du marnage du sud au nord (3,50 m à Flessingue en marée moyenne, contre 1,50 m à Hoek van Holland et 1,35 m au Helder) qui, après la fermeture des exutoires méridionaux du Delta, rejette vers le nord de plus faibles pénétrations de l'onde marée, et qui oblige à se préoccuper des répercussions correspondantes sur le jeu de chasse dans les estuaires navigables et sur les côtes des digues longitudinales de protection.

Le marnage de la marée dans le Haringvliet, toutes écluses fermées dans le barrage de ce nom, sera réduit de 90 %, soit à 0,15 m. Et ces écluses seront fermées normalement, hors des forts débits des fleuves, c'est-à-dire au-dessus de 6 000 m³/s. Cette enclôture, si elle abaisse le niveau moyen dans le Haringvliet, en réduit notablement la salinité, ce qui est un bien pour les polders qui s'y égouttent ou s'y trempent.

On aura besoin d'un barrage supplémentaire dans l'Oude Maas, aux environs de Dordrecht, pour dériver plus d'eau dans le chenal de Rotterdam quand les eaux fluviales sont basses; ouvert, ce barrage soulagera, au contraire, des excès d'eau douce et des courants corrélatifs, cette importante voie navigable.

Si les marées-tempêtes sont réduites dans le nord du Delta par rapport à celle de 1953, en faisant abstraction d'une coïncidence entre une marée-tempête exceptionnelle et un débit exceptionnellement fort des fleuves (probabilité très inférieure à 1 en 10 000 ans) et si les digues peuvent être réglées en conséquence avec une élévation de 5 m au-dessus du niveau moyen de la mer à Hoek, il faut, pour la région de Dordrecht, être plus prudent, parce qu'elle est plus sensible à l'effet des débits fluviaux.

Les différentes combinaisons d'hypothèses les plus probables ont été traitées dans les diverses sous-divisions du chapitre qui se termine par l'introduction des changements à prévoir dans le niveau des marées-tempêtes en raison des travaux même du Delta et par l'indication des vitesses qui se présenteront parfois dans certains bras.

La quatrième partie du volume 5 se place au point de vue hydrologique, c'est-à-dire celui de l'équilibre ou de la lutte contre les eaux salées pénétrant encore par les écluses, les éclusées, les bras navigables, l'égouttement des polders pendant longtemps encore et les eaux douces

d'amont venant des pluies, des fleuves, etc.; eaux plus ou moins polluées, et de plus en plus polluées même en chlorures par le développement industriel du bassin de la Ruhr. En sorte qu'on souhaiterait, — mais qu'on n'est pas certain de pouvoir — maintenir le taux chloré au-dessous de 300 milligrammes par litre.

Une partie importante d'eau douce disponible, qui serait si utile pour l'agriculture, la vie de la population, etc., doit être détournée pour lutter contre la remontée du sel par le fond, par les polders, par les éclusées, par les bras reliant la voie navigable de Rotterdam à la Vieille Meuse (Oude Maas).

Les barrages envisagés faciliteront la lutte s'ils sont bien conçus et exploités.

Les courants, qui seront réduits dans la voie d'eau navigable de Rotterdam, seront accrus au contraire dans les bras de liaison susvisés « Noord » et « Kil » de Dordrecht, et il faudra pouvoir les contrôler par des installations appropriées.

Les courants seront très réduits dans le lac de Zélande et le Haringvliet plus ou moins isolé, et ce, au grand profit de la navigation résiduaire, du tourisme nautique, mais pas à tous les points de vue intégralement comme on le verra au chapitre suivant, ni à celui de l'évacuation des eaux des polders qui exigera certaines chasses momentanées.

Cinquième partie (Glaces, p. 300 du vol. 5).

Même dans le lac de Zélande, le plus exposé à la glaciation par la qualité et le calme de ses eaux, il faut songer à réduire la gêne apportée par l'hiver à la petite navigation ainsi qu'on est déjà entraîné à y pourvoir dans la mer d'Yssel et les lacs de Frise, au climat encore plus dur toutefois.

Dans le bassin du Haringvliet, fermé par les barrages du Volkerak et du Haringvliet, s'accumuleront et descendront grâce au Merwede les glaces charriées par les fleuves, avec une intensité accrue si l'on n'y pare pas à l'aide de manœuvres des écluses de chasse du Haringvliet et parfois par une légère et discrète (à cause de l'agriculture) rentrée d'eau plus salée et plus tiède.

On pense, sans les préciser, à des constructions protectrices pour limiter ces dommages, à une campagne de bris de glace et d'explosifs plus énergique, à l'apport des eaux chaudes provenant des évacuations industrielles.

On expose également d'un point de vue théorique les formes les plus courantes des glaces dans les rivières.

Sixième partie : Mouvements du sable (p. 333 du vol. 5).

Les sables en mouvement peuvent provenir des rivières, de la mer ou du littoral.

On sait qu'avant tous travaux, les Escaut oriental et occidental envoient du sable à la côte, tandis que, plus au nord, les exutoires du Brouwershavensee et du Haringvliet reçoivent du sable de mer.

La suppression de quelques bras transversaux à la côte, qui charriaient des matériaux dans le même sens, formaient des deltas élémentaires et repoussaient au large les courants littoraux parallèles et leurs bancs longitudinaux de séparation, va entraîner très lentement l'effacement de ces deltas et le rapprochement des lits de courant de marée vers la côte, va modifier l'usure de celle-ci et accroître celle des saillants.

On peut prévoir légitimement que les mouvements disparaîtront à peu près complètement dans les lacs intérieurs, mais s'aggraveront dans les canaux de liaison nord-sud, et le Kil froid de Dordrecht. La lenteur des modifications donnera le temps de pourvoir à leurs conséquences et d'organiser les nouvelles défenses de rivages nécessaires.

Des procédés de plus en plus savants sont mis en œuvre pour essayer de déceler le mécanisme fin de ces mouvements, depuis les simples sondages répétés jusqu'aux traceurs radioactifs et aux procédés de laboratoire basés sur des considérations théoriques, et le moyen de repérage Decca vient au secours de ces procédés pour en accroître la précision.

Considérations économiques. — Une dissertation d'ordre économique s'imposait, portant d'abord (vol. 3) sur la valeur des pertes en argent à escompter en cas de dépassement, par une marée-tempête, du niveau des digues, sur le prix de celles-ci selon leur surélévation et sur la probabilité d'un niveau déterminé.

Il n'apparaît pas de chiffre, de tableau ou de formule traduisant le jeu de ces triples données. Mais il est explicité que la surélévation des digues qui réduirait de moitié la probabilité de dépassement est de l'ordre de 0,23 m; celle qui la réduirait au 1/10^e est de l'ordre de 0,78 m.

C'est dans le même ordre d'idées, à la conférence à l'Académie de Marine (fin p. 17 et moitié p. 18) et en neuf pages à la fin du volume 6, qu'on trouvera un aperçu complémentaire des dépenses totales à comparer, selon qu'on opte pour la surélévation des digues actuelles ou pour la solution d'un chapelet de 4 digues primaires et de 4 digues secondaires (Plan Delta). On y

verra que, si la première solution apparaît d'abord plus économique, les avantages du deuxième degré (dessèchement, entretien, liaison, etc.) renversent largement la balance.

Nous signalons en terminant qu'on trouve çà et là, dans les six volumes, de nombreuses figures intéressantes : il faudrait en énumérer trop; nous citons entre autres :

Un tableau des surfaces inondées lors des catastrophes successives, jusqu'à 50 000 hectares en 1877 comme en 1916 (page 19 du rapport final).

La carte générale la plus parlante des implantations des barrages se trouve en annexe 5-0-1 du volume 1.

Des cartes de la progression des dépressions se voient aux pages 16 et 36 du volume 2.

Des courbes des dépassements maximaux des niveaux d'eau entre les années 1888 et 1956 occupent les pages 43 à 50 du volume 3; des courbes de fréquences des marées hautes aux Pays-Bas, les pages 65 à 72.

Des photographies de maquettes des élévations du plan d'eau en divers lieux et circonstances occupent la page 39 du volume 4.

Volume 5 : tableau de la page 182 sur les débits avant et après la réalisation du Plan Delta des divers bras traversiers et exutoires; tableaux de la page 235 sur les débits dans le Scheur, exutoire de Rotterdam, et de la page 286 sur les débits du Noord; page 293, une carte du dessèchement dans le sud-ouest du pays.

Volume 6 : après la page 21, un dépliant rapprochant en un abaque la durée et la vitesse des vents, la hauteur, la période et la portée des ondes correspondantes.

Et cependant que nous analysons trop lentement ces études, les travaux ont commencé et se poursuivent.

À l'occasion de la réunion de la Commission Permanente des Congrès Internationaux de Navigation (juin 1961) nous avons vu notamment, et d'autres ont vu également, la digue du Veerschegat en réfection, le barrage de Grevelingen, le pont de Volkerak (1 500 m), le batardeau de la chambre des vannes du barrage de Haringvliet, le barrage-écluse d'Hagestein.

Ce que nous avons cherché à faire, c'est de vous donner une idée de l'immense travail hollandais et de vous mettre mieux en mesure d'accabler maintenant ses ingénieurs de vos questions.

DISCUSSION

Président : M. DUFFAUT

M. le Président remercie et félicite M. l'Inspecteur général DE ROUVILLE de cet exposé introductif sur le « Plan Delta » et croit que personne n'était mieux placé que lui et n'avait autant d'autorité pour faire un tel exposé. Il y a lieu d'apprécier particulièrement l'habileté de la présentation qui a permis à M. DE ROUVILLE de faire une conférence agréable à entendre tout en faisant état d'une documentation très complète.

M. GOUGENHEIM voudrait profiter de la circonstance pour montrer la différence de comportement de la Manche et de la mer du Nord à l'égard des surélévations de niveau qui sont parfois très importantes et dévastatrices dans la seconde mer, alors que leurs effets sont généralement insignifiants dans la première.

Il y a de nombreuses raisons à cette différence, en particulier, au point de vue météorologique, les dépressions ont tendance à prendre en enfilade la mer du Nord plus souvent que la Manche et à y provoquer un phénomène d'onde stationnaire qui peut être entretenu pendant plusieurs jours si le mouvement de la dépression vient à se ralentir.

D'un autre côté, en ce qui concerne les marées, les pleines mers, en mer du Nord et particulièrement sur les côtes hollandaises, ont une hauteur qui varie assez peu. M. DE ROUVILLE a signalé 0,75 m de différence entre le niveau des pleines mers de vive-eau et celui des pleines mers de morte-eau. Cela tient en partie à ce que le rapport de l'influence lunaire à l'influence solaire, qui, théoriquement, est de 2,17, atteint environ 4 sur les côtes des Pays-Bas, alors qu'il est à peine de 2,9 sur les nôtres, de sorte que le rapport des amplitudes de vive-eau et de morte-eau est de l'ordre de 2 sur les côtes françaises et nettement inférieur sur celles des Pays-Bas. En outre, il existe sur ces dernières des conditions hydrauliques qui font que le niveau des pleines mers varie moins que celui des basses mers.

Enfin l'amplitude de la marée est bien plus grande sur le littoral français de la Manche, si bien que les quais des ports, par exemple, qui sont établis pour ne pas être envahis par les plus grandes pleines mers, sont nettement au-dessus de la plupart des pleines mers et que, pour qu'il y ait inondation, il faudrait la coïncidence, très rare, d'une surélévation importante avec une grande pleine mer de vive-eau; cette inondation serait d'ailleurs très brève, car pour une telle marée, le niveau de l'eau baisse rapidement après le plein.

Un autre phénomène est également favorable à nos

côtes; la théorie et l'expérience sont d'accord pour montrer que les surélévations accidentelles du niveau de l'eau sont normalement plus fortes à basse mer qu'à pleine mer; dans cette dernière phase, en effet, l'énergie perturbatrice trouve, pour se propager, un volume d'eau plus important qu'à basse mer et elle provoque un moindre gonflement des eaux. Le phénomène est particulièrement sensible sur le littoral français de la Manche où, par suite de la grande amplitude de la marée, la différence de niveau entre pleine mer et basse mer est très appréciable.

Ainsi, les côtes de la Manche, et surtout la rive française, bénéficient, en ce qui concerne les « storm surges », de conditions nettement plus favorables que le littoral de la mer du Nord. Il existe bien des surélévations en Manche, mais elles y prennent moins d'importance et passent généralement inaperçues, n'ayant pas de conséquences désastreuses. C'est vraisemblablement la raison pour laquelle le phénomène des « storm surges » a été particulièrement étudié aux Pays-Bas et en Angleterre, où notamment les quais du port de Londres ont fréquemment à pâtir d'inondations provoquées par les surélévations de la mer du Nord.

M. le Président remercie vivement M. GOUGENHEIM pour cette intervention.

M. DE ROUVILLE ajoute que l'on a l'habitude de considérer sur nos côtes, principalement dans le golfe de Gascogne, des dépressions se déplaçant du sud-ouest au nord-est : ces dépressions enfileraient la Manche, de même que la dépression nord-ouest sud-est, dont parle M. GOUGENHEIM, enfile la mer du Nord; mais celle-ci étant beaucoup plus plate, ses eaux se gonflent plus facilement. De plus, le sens des dépressions est commandé par la position habituelle des anticyclones. Ce sont les anticyclones russes qui commandent le sens des dépressions qui viennent de l'ouest en les obligeant à aller au nord. Les dépressions qui viennent sur la France, allant plus franchement du sud-ouest ou nord-est, se heurtent peut-être à l'anticyclone russe; mais elles filent sur la Méditerranée et n'ont pas d'effets sur les côtes de la Manche.

M. BATICLE voudrait connaître la profondeur de l'eau dans les chenaux qui se sont formés.

M. DE ROUVILLE croit qu'elle est de l'ordre de 20 m mais peut atteindre 40 m dans certains sillons des grands barrages.

M. le Président remercie encore M. DE ROUVILLE et les personnes ayant pris part à la discussion.