

COMMUNICATIONS DU SERVICE MARÉOGRAPHIQUE
DE L'INSTITUT MÉTÉOROLOGIQUE DE DANEMARK

PAR

ADAM PAULSEN

Des mesures systématiques de la hauteur du niveau de la mer par des instruments enregistreurs ont été exécutées en Danemark, pendant les dernières 15 années, à 10 différentes stations sur les côtes de la mer du Nord, du Kattegat, du Grand Belt, du Sund et de la Baltique.

Instruments.

Les maréographes dont on s'est servi sont et des appareils à flotteur, construits d'après des principes bien connus, et des appareils pneumatiques qui mesurent la hauteur du niveau de la mer par la pression de l'eau sur une masse d'air enfermé.

Les maréographes pneumatiques qu'on emploie en Danemark n'étant pas généralement connus, on donnera ci-dessous une description un peu détaillée d'un tel instrument.

Le principe du fonctionnement de l'appareil est représenté par le dessin (fig. 1)¹. Au-dessous du niveau de la mer le plus bas on a fixé un tube horizontal *A* de cuivre roulé en spirale, dont le diamètre est de 2^{mm} à peu près. Ce tube

¹ Voir: PAULSEN: Die neuen selbregistrirenden Instrumente des k. dänischen Meteorologischen Instituts. Zeitschr. für Instrumentenkunde 1890, p. 449.

communique par un conduit d'air C , avec un manomètre à mercure M . Le conduit C , ainsi que le tube horizontal A , sont remplis d'air, de sorte que la pression de l'eau sur l'orifice de A peut être mesurée par le manomètre. La longueur du tube horizontal en spirale étant suffisamment grande, on pourrait mesurer des variations du niveau de la mer assez grandes, sans que l'eau pénétrât dans le conduit C . Cependant, pour empêcher par une baisse de mer extraordinaire

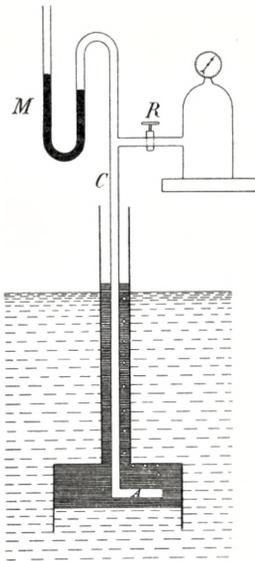


Fig. 1.

une perte de l'air enfermé, le conduit C , d'après une proposition de M. le professeur Prytz, est mis en communication avec un vase à air comprimé. En réglant le robinet R , un courant d'air faible est lancé dans C pour s'écouler en bulles par l'orifice du tube A . L'emploi d'un tel courant d'air permet aussi une longueur relativement grande au conduit d'air dans le cas où les circonstances le demandent¹.

L'expérience a cependant montré qu'un appareil d'une telle disposition ne peut fonctionner que peu de temps, l'orifice du tube horizontal et le conduit d'air étant bientôt engorgé par des sels déposés de l'eau et par la condensation de vapeurs d'eau. Pour se

¹ Dans la *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 1890, p. 145, M. A. Schoenrock, en mentionnant le maréographe danois, fait remarquer que l'emploi d'un courant d'air pour équilibrer la pression d'une colonne d'eau et ainsi en mesurer la hauteur a été déjà mis en usage par M. Wild en 1880. La hauteur fut mesurée par un manomètre à carbonate de potasse. Cependant il faut remarquer que pour la mesure de la hauteur de l'eau, par la méthode mentionnée de M. Schoenrock, on devait presser de l'air dans le conduit, jusqu'à ce que la hauteur du fluide dans le manomètre restât constante. La méthode n'est donc pas utilisable avec des instruments enregistreurs.

mettre à l'abri de cet inconvénient on a entouré le tube *A* d'une cloche ouverte en bas et remplie d'huile de vaseline. Le manchon *b* qui s'avance sur la surface de l'eau (voir fig. 1 et 2)¹ permet de verser l'huile dans la cloche.

Aux stations où le brisant est fort, comme en Danemark à Hirshals (côte nord-ouest du Jutland), l'huile de vaseline est cependant souvent pompée de la cloche ouverte et le tube horizontal est ensablé. On a remédié à cet inconvénient en modifiant la forme du réservoir de l'huile. Au lieu d'un réservoir ouvert on emploie un vase clos. L'eau pénètre dans celui-ci à travers de petits trous *t* (fig. 2) percés, au-dessous du niveau de la mer basse, dans le tube étroit et vertical *a*, qui va à peu près jusqu'au fond du vase. Un peu au-dessous de ces trous une éponge *e* empêche le sable de pénétrer dans le vase. Un autre tube vertical *b*, qui enveloppe le conduit d'air, permet de remplir le vase de l'huile. Cette modification du réservoir s'est trouvée pratique; elle est maintenant

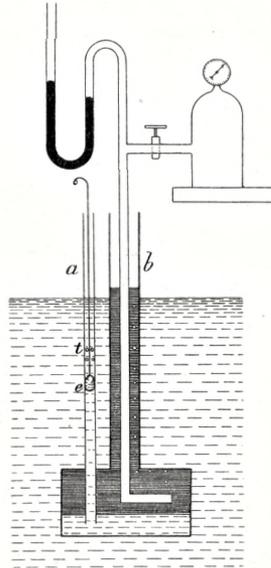


Fig. 2.

¹ On m'a fait connaître qu'on a essayé ailleurs de construire des maréographes pneumatiques. On a fait aboutir le conduit d'air dans un cylindre de grand diamètre et ouvert en bas. L'air enfermé ne permettait à l'eau de pénétrer que très peu dans le vase cylindrique. La hauteur de celui-ci étant très petite par rapport à son diamètre, et le volume très grand par rapport à celui du conduit, une variation même assez grande du niveau de la mer ne faisait varier que très peu la surface de l'eau dans le vase, de sorte qu'on pouvait considérer la position de celle-ci comme constante. La condensation des vapeurs d'eau dans le conduit d'air dont les parties différentes n'avaient pas la même température, mettait cependant bientôt l'appareil hors de service.

en usage dans toutes les stations danoises où on a installé des maréographes pneumatiques¹.

L'appareil enregistreur est, d'après une proposition du feu capitaine Rung, construit de la même manière que celui qui est proposé par M. Sprung pour l'enregistrement de la température de l'air à des points distants². Le déplacement du curseur se fait par un mécanisme particulier inventé déjà en 1872 de M. Rédier (voir ci-dessous).

Le dessin fig. 3 représente l'appareil enregistreur. Un manomètre en acier *M* rempli de mercure est fixé à l'extrémité du petit bras d'une balance. La petite branche du manomètre étant en communication avec le conduit d'air qui aboutit dans l'huile (voir fig. 1 et 2) et la grande branche étant ouverte, la hauteur de la surface de l'eau au-dessus de l'orifice du tube *A* (fig. 1) est déterminée par la différence de hauteur des deux colonnes de mercure dans le manomètre. L'espace au-dessus du mercure dans la petite branche du manomètre est mis en communication avec le conduit d'air *C* (fig. 1) par un tube horizontal d'acier qui va de ladite branche jusqu'à une petite distance au-dessus du couteau de la balance; là le tube horizontal aboutit dans un petit tube vertical appliqué verticalement au-dessus de l'arête du couteau de la balance. De là un tube mince et flexible et enroulé en spirale porte en *I* au conduit d'air *C* (fig. 1) qui par le tube en spirale *A* (fig. 1) aboutit dans l'huile.

L'équilibre de la balance se fait par le déplacement d'un curseur cylindrique de laiton *C* (fig. 3) qui roule sur le long bras *A* de la balance. Le mouvement du curseur est produit de la manière suivante: Sous l'extrémité du bras *A* est appliqué un système de rouages, inventé par Rédier à l'usage

¹ Aux stations maréographiques d'Islande, où le niveau de la mer subit de très grandes variations, on a remplacé l'huile par du chloroforme dont le poids spécifique est plus grand que celui de l'eau.

² Voir Zeitschrift für Instrumentenkunde 1881, p. 358.

de son baromètre enregistreur¹: par ces rouages l'arbre d'acier horizontal à vis *S* est tourné dans l'un ou l'autre sens. Cette rotation de *S* amène le mouvement d'un charriot par une cheville, qui fait corps avec le charriot et qui s'engage entre

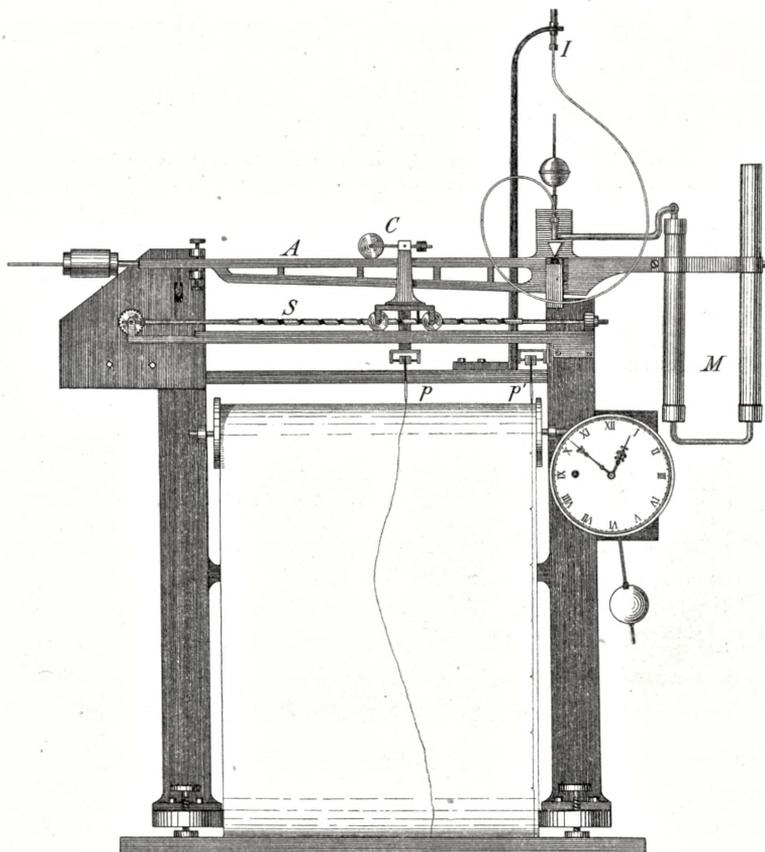


Fig. 3.

les filets de la vis. Le charriot roule sur une règle horizontale, dans l'un ou l'autre sens selon le sens de la rotation de l'arbre à vis *S*. La partie supérieure du charriot porte un petit fléau qui est en équilibre dans une position horizon-

¹ Voir: Violle, Cours de Physique, t. I, p. 816.

taie. Le bras du petit fléau qui donne sur l'extrémité du bras *A* est bifurqué et soutient l'axe de rotation du curseur cylindrique.

Quand le bras *A* de la balance monte, la rotation de *S* amène le chariot vers l'extrémité de ce bras de la balance jusqu'à ce que l'équilibre soit établi par le déplacement du curseur; le contraire a lieu quand le bras *A* baisse.

Ce réglage du mouvement du curseur se fait par l'horloge de Rédier, dont nous allons faire une description que nous empruntons au Cours de Physique de M. Violle.

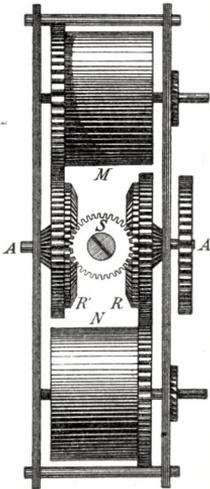


Fig. 4.

„La pièce essentielle du mécanisme est l'arbre *AA* (fig. 4) d'un train différentiel, actionné par les barillets *M*, *N*, de deux forts ressorts d'horlogerie qui tendent à se dérouler en sens inverse. Cet arbre porte fixé perpendiculairement à sa direction un essieu autour duquel tourne librement une roue satellite conique *S*¹, placée entre deux disques *R*, *R'*, tournant eux-mêmes librement autour de l'axe principal. Chaque disque est muni d'une double denture: une denture conique engrenant avec la roue satellite,

et une denture droite par laquelle il engrène avec une couronne dentée entourant la base de l'un des barillets et faisant corps avec lui. Par suite de ces dispositions, quand l'un des barillets *N* reste immobile, l'autre *M*, en tournant, communique sa rotation au disque *R'* avec lequel il engrène, et celui-ci entraîne dans son mouvement la roue satellite qui roule sur la denture conique du disque *R* fixe. Si le second barillet *N* tourne seul, c'est ce disque *R* qui fait tourner la roue satellite, mais cette fois en sens inverse. Enfin, si les

¹ La roue satellite a été imaginée par Huyghens.

deux barillets tournent en même temps avec des vitesses différentes, la roue satellite prend une vitesse égale à la différence des vitesses que lui communiquerait séparément chacun des deux barillets. Or, l'essieu de la roue satellite la suit dans son mouvement, et, comme il est fixé perpendiculairement à l'arbre du train différentiel, il agit sur cet arbre à la façon du bras d'un manège, pour le faire tourner soit à droite, soit à gauche, avec une vitesse proportionnelle à l'excès de la vitesse de l'un des barillets sur celle de l'autre. Des deux ressorts moteurs, l'un M commande un système de rouages, terminé par un échappement de montre, et se déroule d'une façon continue; l'autre N agit sur un système aboutissant à un volant, réglé de telle sorte que la vitesse de déroulement du ressort N soit au moins double de celle de M : de cette manière, quand le volant marche, l'arbre du train reçoit une rotation de sens contraire à celle que produit le premier ressort agissant seul.

La rotation de l'arbre d'acier à vis se fait par l'intermédiaire de la roue Y qui fait corps avec AA . Pour faire tourner l'arbre à vis dans un sens ou dans l'autre une aiguille d'acier appliquée à l'extrémité du long bras de la balance, lâche le volant quand le bras monte et l'arrête quand il s'abaisse.

Supposons maintenant, que l'équilibre soit établi et qu'ensuite la surface de l'eau s'élève. Le mercure est donc lancé de la petite branche du manomètre dans la grande, ce qui fait monter le long bras de la balance, de sorte que le volant soit dégagé. Les deux rouages marchent donc à la fois, ce qui amène une rotation de l'arbre à vis, de sorte que le chariot se déplace vers l'extrémité du long bras de la balance, jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli par le déplacement du curseur. Si, au contraire, le niveau de la surface de l'eau descend, le long bras de la balance s'abaisse, ce qui arrête le volant. Le rouage M , en marchant seul, fait donc tourner l'arbre dans le sens contraire, ce qui amène un déplacement

du curseur vers le couteau de la balance. Si le niveau de l'eau ne varie pas, la rotation de l'arbre à vis déplace le curseur dans l'un ou l'autre sens, ce qui rompt l'équilibre et fait retourner le curseur sur ses pas pour recommencer cette marche de va-et-vient. Dans ces circonstances, le curseur fait des oscillations perpétuelles qui pourtant, par suite d'un réglage convenable de la balance, sont si petites qu'on peut considérer le curseur comme restant en place.

La courbe représentant les variations du niveau de la surface de l'eau est tracée sur un rouleau de papier par une plume p qui fait corps avec le chariot (fig. 3). Cette plume consiste en un tube capillaire tiré en pointe et recourbé vers son extrémité; ce tube capillaire est rempli d'un mélange d'encre et de glycérine. Le papier est enroulé autour d'un cylindre, qui tourne au moyen d'une horloge. Une autre plume p' , qui est fixe, trace la ligne de base et marque le temps.

Théorie du maréographe.

Désignons (fig. 5) la hauteur du mercure dans la longue

branche du manomètre par	x
" celle dans la petite branche par	y
" la section du tube du manomètre par.....	o
" et celle du tube qui fait communiquer les deux	
branches par	ω
" la longueur de ce tube par	l
" la distance de l'axe de la grande branche du	
manomètre au plan vertical qui contient l'arête	
du couteau de la balance par	a
" la distance correspondante de l'axe de la petite	
branche par	b
" le poids du mercure dans le manomètre par...	P
" le poids du curseur par.....	v
" le poids spécifique du mercure par	δ
" le poids spécifique de l'eau par	δ'

Désignons la distance du curseur au plan vertical contenant l'arête du couteau par..... z
 l'équation d'équilibre du système est exprimée par

$$ox\delta a + oy\delta b + l\omega\delta \frac{a+b}{2} = vz + M \dots \dots \dots (I)$$

où M représente le moment du fléau de la balance et du manomètre.

Nous avons encore

$$o(x + y)\delta + \omega l\delta = P$$

et

$$o(x - y)\delta = oH\delta'$$

où H est la hauteur de l'eau au-dessus du tube horizontal en spirale. De ces deux équations on trouve

$$x = \frac{1}{2} \frac{P - \omega l\delta + H\delta'o}{o\delta}$$

$$y = \frac{1}{2} \frac{P - \omega l\delta - H\delta'o}{o\delta}$$

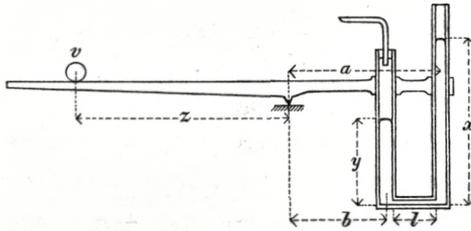


Fig. 5.

Substituons ces valeurs de x et de y dans l'équation (I), nous avons

$$\frac{1}{2}(a + b)P + \frac{1}{2}H\delta'o(a - b) = vz + M.$$

En différenciant cette équation par rapport à H et z , on trouve

$$\frac{1}{2}(a - b)\delta'o\delta H = vdz.$$

Cette équation donne la relation entre les variations de la hauteur de l'eau et celles des ordonnées de la courbe maréographique.

Désignons par a_0, b_0, o_0 et dz_0 les valeurs de a, b, o , et dz par la température de zéro, par λ et α les coefficients de température du laiton et de l'acier, on a

$$\frac{1}{2}(a_0 - b_0)o_0\delta'dH = vdz_0$$

$$\frac{1}{2}(a_0 - b_0)o_0(1 + (\lambda + 2\alpha)t)\delta'dH = vdz_t.$$

Pour la même variation de la hauteur de l'eau, nous avons

$$dz_t = (1 + (\lambda + 2a)t) dz_0,$$

ce qui donne pour $\lambda = 0.000018$ et $a = 0.000011$

$$dz_t = (1 + 0.00004t) dz_0.$$

Pour $dz_0 = 0.1 dH$, une variation de la hauteur de l'eau d'un mètre donne un déplacement de la plume $\Delta z_0 = 100\text{mm}$. Pour $t = 20^\circ$ on a $\Delta z_{20} = 100.08\text{mm}$.

Les variations de la température de l'appareil enregistreur ne modifient donc la courbe maréographique que d'une manière presque insensible.

En outre, l'effet de ces variations comme de celles du poids spécifique de l'eau et d'autres choses accidentelles entre dans la correction pour la valeur de la ligne zéro de la courbe maréographique.

Pour cette correction on fait d'abord la lecture de la distance de la surface de l'eau au point zéro d'une échelle verticale fixe, qui s'enfonce dans l'eau.

En additionnant à cette lecture la valeur réduite de la distance du point correspondant de la courbe maréographique à la ligne zéro, la somme représente la hauteur du point zéro de l'échelle au-dessus du niveau de la mer qui correspond à la ligne zéro de la courbe.

Le tableau ci-dessous montre pour une période de deux années la valeur des moyennes mensuelles de ladite distance. Le tableau commence par le mois de février 1897, où on a installé un nouveau maréographe à Copenhague.

	cm		cm
1897 Février.....	252.78	1897 Août	250.37
Mars.....	251.58	Septembre...	250.63
Avril	252.35	Octobre	250.73
Mai	252.14	Novembre...	251.26
Juin	251.21	Décembre ...	251.80
Juillet	250.00	1898 Janvier.....	251.88

	cm		cm
1898 Février.....	251.28	1898 Août	250.89
Mars.....	251.50	Septembre...	250.75
Avril	251.78	Octobre	251.30
Mai.....	251.71	Novembre...	251.81
Juin	251.31	Décembre ...	252.29
Juillet.....	250.83	1899 Janvier.....	251.86

Le tableau montre que les variations de la valeur de la ligne zéro sont si petites qu'il est facile d'en tenir compte.

Le maréographe que nous avons décrit ici ne demande pas de puits, et l'appareil est en bonne fonction, quand même la mer est couverte de glace. Le conduit d'air peut être assez long. A Hirshals, côte nord-ouest du Jutland, où l'appareil enregistreur est installé sur un môle de béton, le conduit d'air a une longueur de 50 mètres. La construction d'un puits à cette station aurait été très coûteuse, et on aurait eu de grandes difficultés à empêcher le puits de s'ensabler.

Stations maréographiques.

Des maréographes sont installés aux stations suivantes:

Aux côtes de la mer du nord.

1) Esbjerg ($\varphi = 55^{\circ} 28'$, $\lambda^1 = 8^{\circ} 27'$) à la côte sud-ouest du Jutland. Appareil à flotteur installé au point nord du môle ouest. Les variations du niveau de la mer sont 15 fois plus grandes que celles de la courbe maréographique. L'appareil fonctionne depuis mars 1889. A quelques kilomètres à l'ouest d'Esbjerg est située la petite île de Fanø. La mer entre cette île et Esbjerg est pleine de bas-fonds.

2) Hirshals ($\varphi = 57^{\circ} 36'$, $\lambda = 9^{\circ} 58'$). Maréographe pneumatique; $\frac{dH}{dz} = 10.0$. L'appareil enregistreur est installé sur une voûte qui est bâtie sur un môle de béton allant de la

¹ Les longitudes sont comptées du méridien de Greenwich.

côte dans la pleine mer. Le conduit d'air va de l'appareil enregistreur le long du môle sur une longueur de 50 mètres avant de descendre au vase de l'huile de vaseline. Le maréographe fonctionne dès janvier 1891.

Aux côtes du Kattegat.

3) Frederikshavn ($\varphi = 57^{\circ} 26'$, $\lambda = 10^{\circ} 34'$). Maréographe à flotteur, installé sur le môle nord du port; $\frac{dH}{dz} = 10.0$.

Le port est ouvert au Kattegat. L'appareil fonctionne depuis février 1893.



Fig. 6. Situation des stations maréographique.

4) Aarhus ($\varphi = 56^{\circ} 9'$, $\lambda = 10^{\circ} 13'$). Maréographe pneumatique; $\frac{dH}{dz} = 9.76$. Installé sur le môle nord du port qui s'ouvre directement au Kattegat. L'appareil fonctionne depuis le mois de septembre 1888.

5) Fredericia ($\varphi = 55^{\circ} 34'$, $\lambda = 9^{\circ} 46'$).

Appareil pneumatique, installé à l'extrémité du môle ouest du bassin des bacs à vapeur; $\frac{dH}{dz} = 10.0$. La station est située à l'angle sud-ouest du Kattegat à l'entrée du Petit Belt. A fonctionné depuis août 1889.

6) Hornbæk ($\varphi = 56^{\circ} 6'$, $\lambda = 12^{\circ} 28'$) à la côte nord de l'île de Sélande. Appareil pneumatique, installé sur le quai nord du port qui s'ouvre directement au Kattegat; $\frac{dH}{dz} = 10.0$. Le maréographe fonctionne depuis septembre 1890.

Aux côtes du Grand Belt.

7) Slipshavn ($\varphi = 55^{\circ} 17'$, $\lambda = 10^{\circ} 50'$). Appareil pneumatique installé sur le quai; $\frac{dH}{dz} = 10.0$. La station est située à l'entrée du Fjord de Nyborg. Le maréographe fonctionne depuis le mois d'août 1889.

8) Korsør ($\varphi = 55^{\circ} 20'$, $\lambda = 11^{\circ} 8'$). Maréographe pneumatique installé sur le quai du port sud, près du pont qui mène à Halskov près de la bouche de l'étang salé de Korsør. $\frac{dH}{dz} = 10.0$. L'appareil fonctionne depuis janvier 1890.

Aux côtes du Sund.

9) Copenhague ($\varphi = 55^{\circ} 41'$, $\lambda = 12^{\circ} 36'$). Appareil pneumatique installé à l'entrée du port intérieur. $\frac{dH}{dz} = 10.4$. Le maréographe fonctionne depuis le mois de juin 1888.

Aux côtes de la Baltique.

10) Gjedser ($\varphi = 54^{\circ} 34'$, $\lambda = 11^{\circ} 58'$) au point sud de l'île de Falster. Maréographe à flotteur, installé en janvier 1892; $\frac{dH}{dz} = 10.0$.

Résultats des mesures du niveau de la mer.

Le directeur des travaux géodésiques en Danemark, son Excellence le général ZACHARIE, a eu l'obligeance de me faire part des résultats des mesures de la hauteur du niveau moyen de la mer aux différentes stations maréographiques, et de m'autoriser à en publier les résultats. On trouve dans ce qui va suivre l'aperçu du rapport qu'on a bien voulu me donner sur ce sujet.

Le nivellement qui lie entre eux les points zéro des échelles aux différentes stations n'est déterminé définitivement qu'en Jutland; celui qui embrasse les stations dans les îles danoises n'est encore qu'un nivellement préalable, mais pourtant on

ne doit pas y supposer d'erreurs d'importance. Toutes les mesures sont rapportées à la cote 35.553 mètres + NN du repère prussien no. 8609.

Le tableau ci-dessous donne pour les différentes années la cote de toutes les stations maréographiques en Danemark.

Tableau représentant la cote du niveau moyen de la mer NN—x mètres.

Stations	φ	λ	1889	1890	1891	1892	1893	1894
			m	m	m	m	m	m
Hirshals	57° 36'	9° 58'	—	—	—	0.323	0.256	0.253
Frederikshavn	57 26	10 34	—	—	—	—	0.244	0.276
Aarhus	56 9	10 13	0.281	0.261	0.287	0.291	0.275	0.270
Fredericia	55 34	9 46	—	0.252	0.280	0.278	0.256	0.274
Esbjerg	55 28	8 27	—	0.203	0.187	0.219	0.164	0.162
Hornbæk	56 6	12 28	—	—	—	—	—	—
Copenhague	55 41	12 36	0.243	0.204	0.249	0.233	0.200	0.230
Korsør	55 20	11 8	—	—	—	—	—	—
Slipshavn	55 17	10 50	—	—	—	—	—	—
Gjedser	54 34	11 58	—	—	—	—	—	—

Stations	1895	1896	1897	1898	1899	1900	1901	1902
	m	m	m	m	m	m	m	m
Hirshals	0.292	0.302	0.325	0.242	0.245	0.296	0.330	0.312
Frederikshavn	0.290	0.299	0.307	0.251	0.249	0.283	0.328	0.292
Aarhus	0.268	0.275	0.287	0.234	0.214	0.279	0.307	0.234
Fredericia	0.250	0.273	0.273	0.213	0.211	0.263	0.288	0.264
Esbjerg	0.219	0.212	0.208	0.154	0.144	0.214	0.246	0.237
Hornbæk	—	—	—	0.185	0.148	0.248	0.278	0.238
Copenhague	0.218	0.230	0.229	0.172	0.131	0.235	0.254	0.232
Korsør	—	—	0.243	0.185	0.142	0.230	0.252	0.230
Slipshavn	—	0.275	0.271	0.218	0.173	0.256	0.288	0.265
Gjedser	—	—	—	0.203	0.124	0.230	0.268	0.248

Le tableau suivant montre pour les différentes stations les hauteurs moyennes annuelles du niveau de la mer rapportées à celle de la station de Frederikshavn.

On voit que le niveau de la mer va en croissant du nord au sud d'une manière assez régulière. Aussi, les courants marins dans les mers qui baignent les côtes danoises vont-ils en général du sud au nord.

Les mesures montrent que le niveau de la Baltique est à peu près 6^{cm} plus haut que celui de la mer dans la partie nord du Kattegat. Cette différence ne peut pas être attribuée, à l'effet du vent, car les vents de la moitié ouest de l'horizon qui poussent l'eau de la Baltique sud vers l'est sont de beaucoup plus fréquents que ceux de la moitié est.

La hauteur relativement grande de la surface de la mer à Esbjerg s'explique, nous le verrons ci-dessous, essentiellement par la prédominance des vents de la région ouest. A cette station les courants marins ne semblent pas influencer la hauteur du niveau de la mer d'une manière sensible. Nous

Stations	1893	1894	1895	1896	1897	1898	1899	1900	1901	1902	Moy.
	cm										
Frederikshavn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hirshals	-1.2	2.3	-0.2	-0.3	-1.8	0.9	0.4	-1.3	-0.2	-2.0	-0.3
Aarhus	-3.1	0.6	2.2	2.4	2.0	1.7	3.5	0.4	2.1	5.8	1.8
Fredericia	-1.2	0.2	4.0	2.6	2.4	3.8	3.8	2.0	4.0	2.8	2.4
Esbjerg	8.0	11.4	7.1	8.7	9.9	9.7	10.5	6.9	8.2	5.5	8.6
Hornbæk	—	—	—	—	—	6.7	10.1	3.5	5.0	5.4	6.1
Copenhague ..	4.4	4.6	7.2	6.9	7.8	7.9	11.8	4.8	7.4	6.0	6.9
Korsør	—	—	—	—	6.4	6.6	10.7	5.3	7.6	6.2	7.1
Slipshavn	—	—	—	2.4	3.6	3.3	7.6	2.6	4.0	2.7	3.7
Gjedser	—	—	—	—	—	4.8	12.5	5.3	6.0	4.4	6.6

allons voir que, pendant une période de calmes et de vents variables et faibles, la surface de la mer était à Esbjerg au même niveau qu'à Frederikshavn. Entre la hauteur de la surface de la mer à Korsør et celle de la mer à Slipshavn il y a une différence de 3^{cm}.4 en moyenne. Cette différence de hauteur est trop grande pour être expliquée par le régime du vent, les deux stations n'étant distantes que de 20 kilomètres l'une de l'autre. Aussi verrons-nous plus loin que cette différence de niveau est due au courant marin qui, venant du Langelands Belt, détroit entre les îles de Langeland et de Laaland, se heurte contre les bas-fonds et les côtes de l'île de Sélande aux environs de la ville de Korsør.

Marche annuelle du niveau de la surface de la mer. Les moyennes mensuelles de la hauteur de la mer dénotent, pour toutes les stations, une marche annuelle très prononcée avec un minimum au mois d'avril et un maximum en septembre ou en octobre. Ce n'est qu'à Frederikshavn que le maximum tombe, pour la période considérée, en décembre; mais ce dernier maximum est dû seulement à une hausse de mer extraordinairement grande au mois de décembre 1898, et qui a de même causé des irrégularités aux autres stations

Marche annuelle de la hauteur de la surface de la mer.

Stations	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septbr.	Octbr.	Novbr.	Déchr.
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
Hirshals	-0.3	-4.6	-8.8	-10.8*	-10.7	-2.9	5.2	7.2	8.8	6.6	3.7	6.6
Frederikshavn	1.2	-4.7	-7.4	-11.6*	-9.6	-3.2	3.9	5.5	6.6	6.7	5.3	7.3
Aarhus	2.0	-5.2	-5.2	-9.3*	-7.2	-3.1	2.0	4.1	6.3	6.7	4.5	4.4
Fredericia	0.6	-2.7	-4.5	-6.6*	-5.4	-2.6	1.3	2.8	5.1	6.0	3.4	2.6
Esbjerg	3.0	-7.2	-4.3	-13.6*	-12.2	-8.5	0.7	6.2	8.6	12.8	2.9	12.0
Hornbæk	-2.1	-5.1	-6.9	-11.4*	-8.7	-1.6	6.3	7.5	9.8	5.8	2.4	4.0
Copenhague	0.0	-2.7	-6.5	-9.4*	-8.9	-2.4	5.0	6.7	7.7	5.7	2.2	2.6
Korsør	-0.4	-2.7	-4.8	-7.2*	-6.0	-2.3	3.2	4.2	5.8	5.5	2.5	2.2
Slipshavn	0.9	-2.0	-4.0	-7.8*	-6.5	-2.7	2.4	3.8	5.5	5.4	3.8	1.2
Gjedser	-2.5	1.3	-3.6	-6.3*	-4.9	-2.2	3.8	4.9	6.0	3.2	0.5	-0.2

maréographiques. En omettant la moyenne de décembre 1898, le maximum tomberait à Frederikshavn en octobre, et la moyenne de décembre se réduirait à 5^{cm}.0. A Esbjerg, où la moyenne de décembre ne diffère que de 0^{cm}.8 du maximum d'octobre, la suppression de la moyenne de décembre 1898 réduirait la grande moyenne du même mois à 8^{cm}.5.

Les courbes (fig.7—16) donnent une représentation graphique de l'allure annuelle du niveau de la mer aux différentes stations maréographiques. La ligne pointée pour le mois de décembre donne la grande moyenne de ce mois quand on a supprimé la moyenne de décembre 1898.

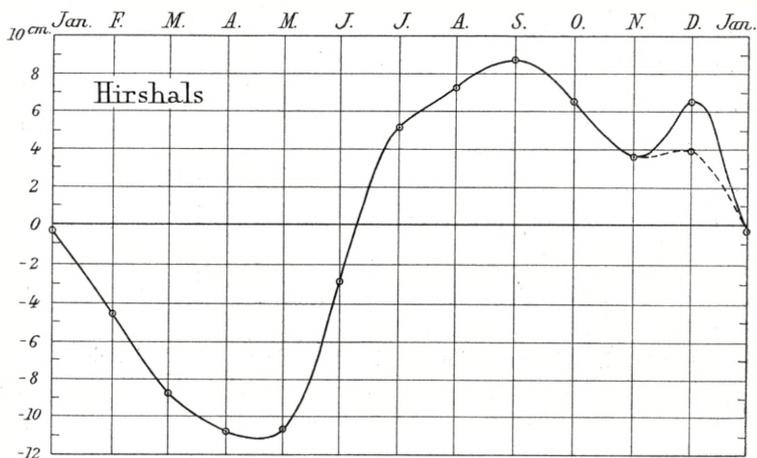


Fig. 7. Marche annuelle du niveau de la mer à Hirshals.

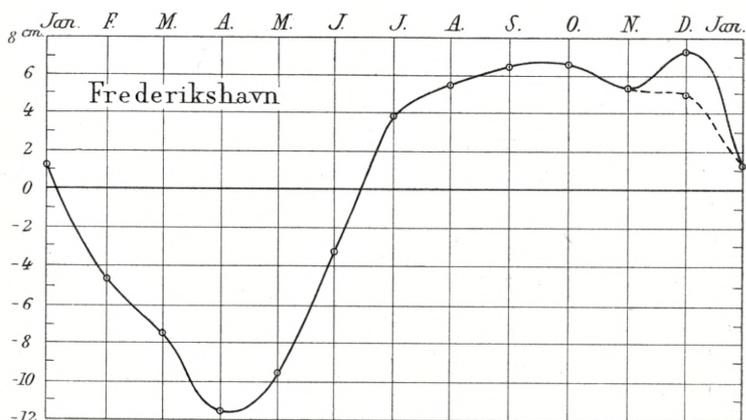


Fig. 8. Marche annuelle du niveau de la mer à Frederikshavn.

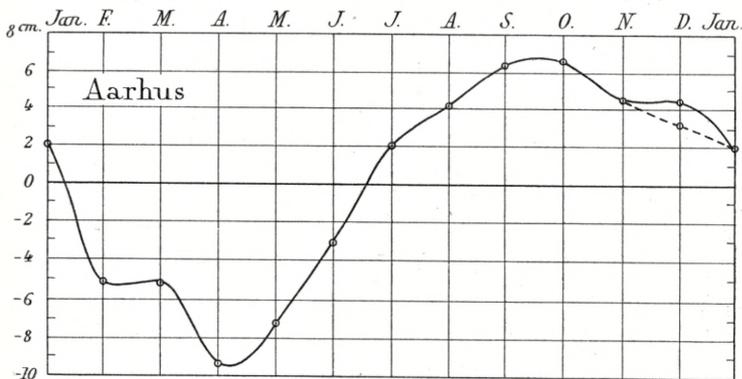


Fig. 9. Marche annuelle du niveau de la mer à Aarhus.

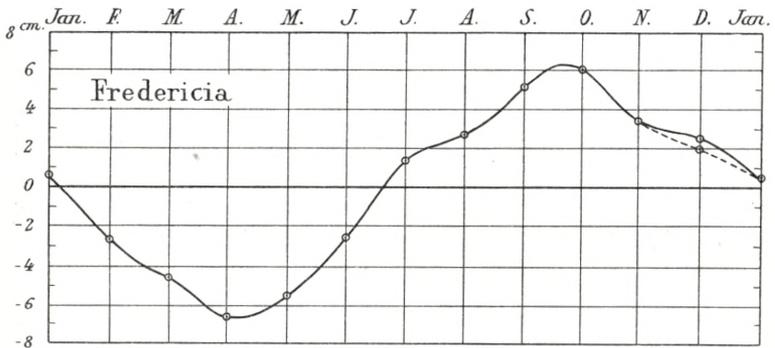


Fig. 10. Marche annuelle du niveau de la mer à Fredericia.

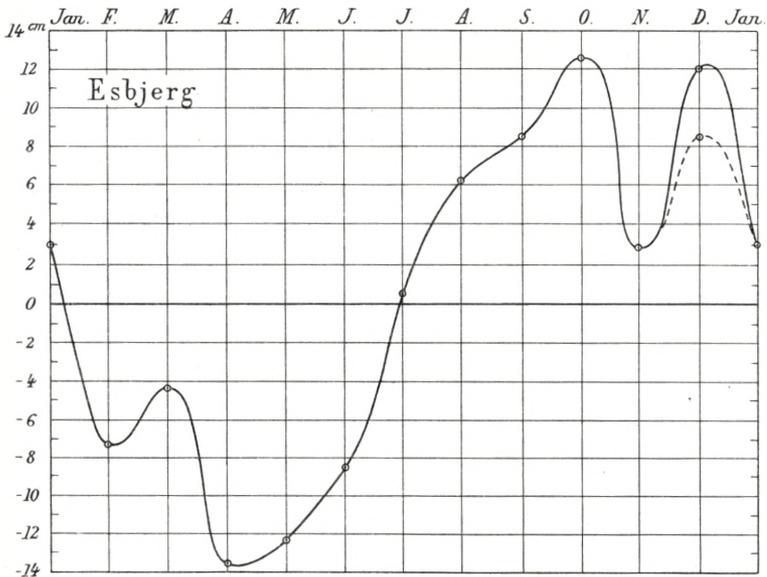


Fig. 11. Marche annuelle du niveau de la mer à Esbjerg.

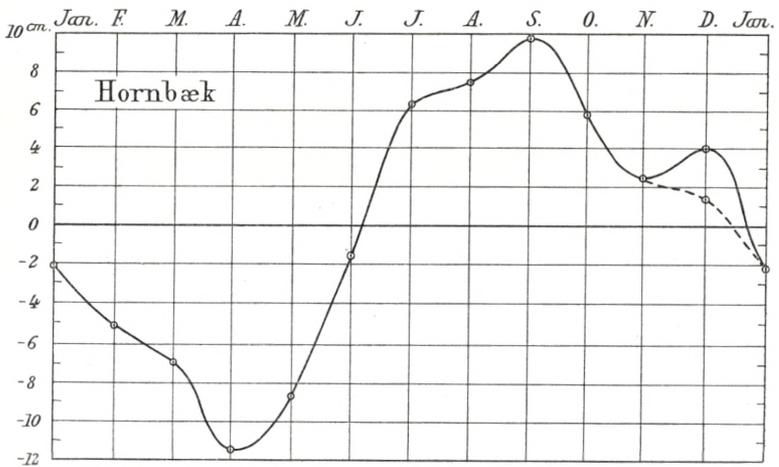


Fig. 12. Marche annuelle du niveau de la mer à Hornbæk

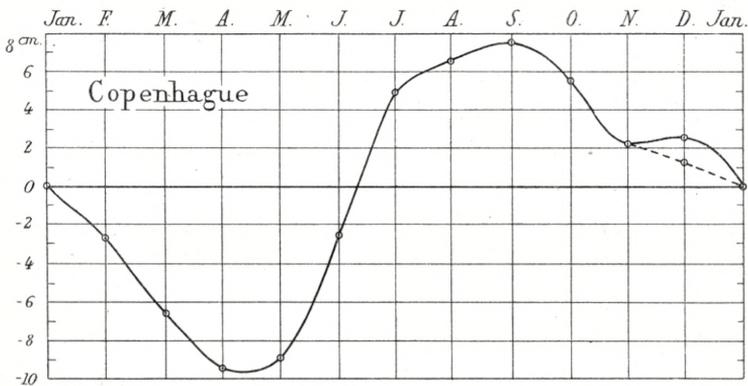


Fig. 13. Marche annuelle du niveau de la mer à Copenhague.

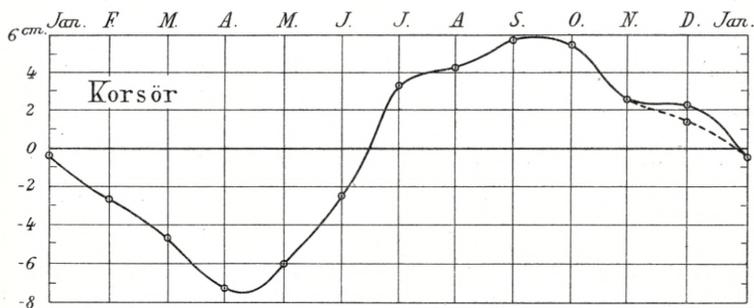


Fig. 14. Marche annuelle du niveau de la mer à Korsör.

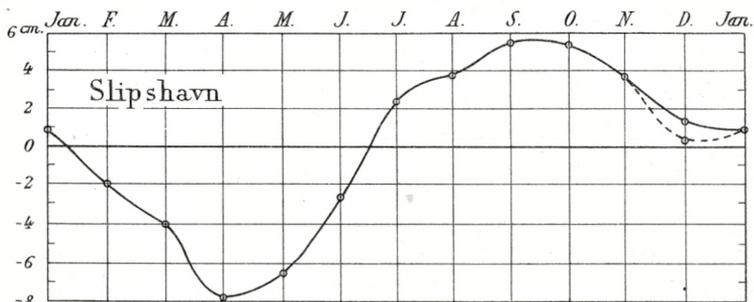


Fig. 15. Marche annuelle du niveau de la mer à Slipshavn.

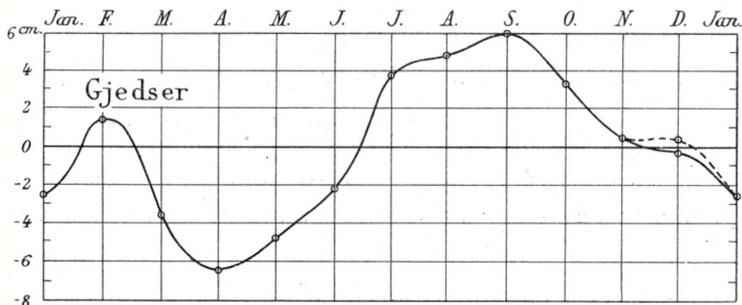


Fig. 16. Marche annuelle du niveau de la mer à Gjedser.

Influence du vent sur la hauteur du niveau de la mer. La variation annuelle du niveau de la surface de la mer est liée, d'une manière très intime, avec la direction et la force du vent. Les vents de la moitié ouest de l'horizon, s'ils ne sont pas très rapprochés du sud, poussent l'eau de la mer du Nord à travers le Skagerak dans le Kattegat et vers les côtes ouest du Jutland; les vents de l'autre moitié de l'horizon ont l'effet opposé.

Désignons par W la somme des vents qui, pendant une série d'années, ont soufflé, dans le même mois de la moitié ouest de l'horizon, et de même par E la somme des vents de l'autre moitié de l'horizon, le tableau suivant montrera pour les différentes séries d'années pendant lesquelles les maréographes ont fonctionné, les valeurs mensuelles de $\frac{W}{E}$.

Valeurs de $\frac{W}{E}$.

Stations	Période	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septbr.	Octbr.	Novbr.	Décbr.
Hirshals	1892—1902	1.3	1.2	1.3	1.1	1.1	2.0	2.9	2.4	2.1	1.6	1.4	1.3
Frederikshavn	1893—1902	1.3	1.3	1.4	1.0	1.1	1.9	2.8	2.4	2.1	1.6	1.5	1.2
Aarhus	1889—1902	1.4	1.2	1.3	0.9	1.1	2.0	2.8	2.6	2.2	1.5	1.3	1.2
Fredericia	1890—1902	1.4	1.3	1.3	1.0	1.2	2.1	2.8	2.5	2.2	1.6	1.2	1.2
Esbjerg	1890—1902	1.4	1.3	1.3	1.0	1.2	2.1	2.8	2.5	2.2	1.6	1.2	1.2
Hornbæk	1898—1902	2.0	1.1	1.1	0.9	1.1	1.7	3.0	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3
Copenhague	1889—1902	1.4	1.2	1.3	0.9	1.1	2.0	2.8	2.6	2.2	1.5	1.3	1.2
Korsør	1897—1902	1.5	1.3	1.0	0.9	1.1	1.7	2.9	2.0	2.0	1.6	1.4	1.3
Slipshavn	1896—1902	1.7	1.3	1.1	1.0	1.2	1.7	2.7	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2
Gjedser	1898—1902	2.0	1.1	1.1	0.9	1.1	1.7	3.0	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3

Le tableau montre que $\frac{W}{E}$ a partout sa plus petite valeur au mois d'avril, où le niveau de la mer est le plus bas. En partant de ce mois $\frac{W}{E}$ va en croissant jusqu'au mois de juillet; pourtant sa valeur est encore assez grande en août et en septembre, et la force moyenne du vent va en croissant vers

l'automne, de sorte que sa valeur n'est, en juillet et en août, que de 3.0 (échelle 0—12), tandis qu'en octobre elle s'élève à 3.7.

Les vents venant des régions sud poussent l'eau du Kattegat dans la mer du Nord, où l'eau est reculée, par ces mêmes vents, vers le nord dans l'Atlantique. Aussi, quand les vents du sud sont prédominants il y a toujours mer basse dans les eaux qui entourent le Danemark. C'est au printemps aussi que le vent moyen s'approche le plus du sud, sa direction étant S. 19° W. Pendant l'été sa direction est le plus rapprochée de l'ouest, savoir S. 75° W. pour devenir S. 33° W. en automne et S. 25° W. pendant l'hiver.

Les moyennes mensuelles de la hauteur de la surface de la mer subissent, surtout sur la côte ouest du Jutland, des grandes variations selon la direction et la force du vent prédominant. C'est ainsi que pendant le mois de décembre 1898 la hauteur moyenne de la mer était de 54^{cm} au-dessus de la grande moyenne annuelle. Pour ce mois, le rapport entre la fréquence des vents de la partie ouest de l'horizon et celle des vents de la moitié opposée était de 6.6, savoir plus de 5 fois plus grand que la valeur normale. La force moyenne du vent était extraordinairement grande, savoir 5.2 (échelle de Beaufort), ce qui est la plus grande force moyenne d'un seul mois qu'on ait observé depuis le commencement des observations du vent dans les stations ressortissant à l'Institut météorologique de Danemark.

Au mois de janvier 1890 la moyenne de la hauteur de la mer à Esbjerg était de 34^{cm} au-dessus de la valeur normale annuelle, $\frac{W}{E}$ étant 3.6 ou trois fois plus grande que la valeur normale de ce rapport. Au mois suivant le niveau de la mer s'était abaissé jusqu'à 33^{cm} au-dessous de la grande moyenne annuelle, le rapport $\frac{W}{E}$ n'étant que la moitié de sa valeur normale.

Effet des grandes tempêtes. La situation du Danemark entre la mer du Nord ouverte et les mers intérieures, le Kattegat et la Baltique, fait que les grandes tempêtes peuvent, sur quelques parties de la côte, causer une haute mer extraordinaire, tandis que la même tempête fait reculer la mer sur d'autres parties. Les vents d'ouest forts poussent l'eau de la mer du Nord dans le Kattegat, tandis qu'en même temps l'eau de la partie ouest de la Baltique est repoussée vers les parties est de cette mer.

C'est ainsi que pendant la grande tempête d'ouest et d'ouest-nord-ouest, le 25 et le 26 décembre 1902, la mer inonda les côtes nord de l'île de Sélande et qu'en même temps la tempête causa une basse mer extraordinaire aux littoraux de la mer Baltique. Cette grande tempête d'une force de 30—35^m par seconde poussa l'eau de la mer du Nord dans le Kattegat de sorte que le niveau y allait en croissant du nord au sud; les détroits entre le Kattegat et la Baltique ayant trop peu de largeur et de profondeur pour donner issue libre dans la Baltique à l'abondance de l'eau dans la partie sud du Kattegat. A Frederikshavn la plus grande hauteur de la mer était de 111^{cm} au-dessus de la moyenne; à Aarhus la hauteur de l'eau surpassa la valeur normale de 121^{cm}. Malheureusement la haute mer détruisait le maréographe de Hornbæk. A Copenhague la courbe maréographique dénote une haute mer de 157^{cm} au-dessus de la grande moyenne annuelle, ce qui montre que le niveau de la mer, pendant la tempête, doit avoir été beaucoup plus haut dans les parties est du Kattegat que sur les côtes du Jutland. C'est ce qui montre aussi le fait que la mer à Aarhus continua de monter pendant 12 heures après que le maximum de la hauteur fut atteint à Copenhague. A Copenhague la hauteur de maximum avait lieu au moment même de la plus grande violence de la tempête. La tempête d'ouest ayant poussé l'eau dans le Kattegat vers les côtes de la Suède,

l'eau recula vers les côtes d'est du Jutland quand la force du vent diminua.

Pendant la plus grande haute mer à Copenhague une basse mer extraordinaire eut lieu à la ville de Køge, située à 30 kilomètres au sud-ouest de Copenhague au fond d'une baie qui s'ouvre à la Baltique. La tempête ayant poussé l'eau de la baie de Køge vers la Baltique, la mer s'était abaissée près de cette ville de 300^{cm} au-dessous de la hauteur moyenne. Il y avait donc, au même temps, une différence de 460^{cm}, à peu près, entre la hauteur de la surface de la mer à Copenhague et à Køge. A Gjedser la mer se retira pendant la plus grande force de la tempête jusqu'à 150^{cm} au-dessous de la hauteur moyenne.

Pendant la tempête, des forts courants marins ont transporté du Kattegat à la Baltique de grandes masses d'eau qui furent poussées vers les parties est de cette mer. Ainsi, après la fin de la tempête les eaux reculèrent vers les parties ouest de la Baltique et y produisirent une haute mer.

Niveau de la surface de la mer pendant une période de vents faibles et variables et de haute pression atmosphérique. Pour examiner la question de la hauteur de la surface de la mer pendant une période où l'influence du vent était éliminée, on a déterminé aux différentes stations la hauteur de la mer pendant la période du 19 octobre au 9 novembre 1897. Pendant toute cette période de trois semaines le Danemark était situé dans le centre, à peu près, d'une aire de haute pression atmosphérique; les vents étaient faibles et variables et les calmes fréquents. La moyenne barométrique tirée des observations à 8^h du matin était, à Copenhague et à Skagen de 774^{mm}.3 et à Esbjerg de 773^{mm}.9. La force moyenne du vent était, à Copenhague de 1.1 (échelle de Beaufort), à Skagen de 0.9 et à Esbjerg de 1.2. A Copenhague et à Esbjerg ce n'est que quatre fois qu'on a observé, à 8^h du matin, une

force de 2, et ce maximum de la force ne fut observé qu'une seule fois à Skagen.

Les courbes maréographiques de ladite période ont donné aux différentes stations les différences suivantes entre la hauteur moyenne de la surface de la mer et la grande moyenne annuelle :

	cm		cm
Esbjerg	— 23.4	Hornbæk	— 8.2
Hirshals	— 16.2	Copenhague	— 6.4
Frederikshavn	— 15.1	Korsør	— 1.9
Aarhus	— 8.9	Slipshavn	— 5.7
Fredericia	— 3.4	Gjedser	+ 2.2

En rapportant la hauteur de la mer dans les différentes stations au niveau de la surface de l'eau à Frederikshavn, nous trouvons pour

	cm		cm
Esbjerg	0.3	Hornbæk	13.0
Hirshals	— 1.4	Copenhague	15.6
Frederikshavn	0.0	Korsør	20.3
Aarhus	8.0	Slipshavn	13.1
Fredericia	14.1	Gjedser	23.9

Le tableau montre que pendant cette période de calmes et de vents faibles et variables la surface de la mer était pratiquement parlant au même niveau le long de toute la côte ouest du Jutland jusqu'à la partie nord de la côte est. C'est donc aux vents d'ouest prédominants qu'on doit attribuer la hauteur relativement grande du niveau moyen de la surface de la mer à Esbjerg. Les courants marins ne semblent pas influencer sensiblement sur la hauteur de la mer à cette station.

Pendant ladite période, la pression barométrique était très haute sur la mer du Nord et décroissait vers le Pas de Calais et vers le nord. Cette haute pression et les vents anticyclo-

riques causaient le retour de l'eau de la mer du Nord vers l'Atlantique et par conséquent une basse mer le long de la côte ouest du Jutland. Pendant le mois de septembre 1897, des vents d'ouest assez forts avaient amené une haute mer qui, en moyenne, surpassait de 20^{cm} la grande moyenne annuelle de la hauteur de la mer à Esbjerg. Le rapport entre la fréquence des vents de la moitié ouest de l'horizon et celle des vents qui soufflaient de la moitié opposée était dans ce mois de 3.2, savoir le double à peu près de la valeur normale 1.7. La hauteur moyenne du niveau de la mer dudit mois de septembre a donc été de 43^{cm} environ au-dessus de celle de la période de calmes du 19 octobre jusqu'au 9 novembre.

La largeur et la profondeur relativement petites des détroits entre le Kattegat et la Baltique empêchaient pendant ladite période les eaux de la Baltique de se niveler avec celles de la mer du Nord. Le tableau de la répartition de la hauteur du niveau de la mer aux différentes stations montre que, pendant la période de calme, le niveau de la surface de la mer à Korsør était de 7^{cm}.2 plus haut que celui de la surface de la mer à Slipshavn, situé à l'autre côté du Grand Belt, ou de 3^{cm}.8 au-dessus de la différence des hauteurs moyennes. On ne doit donc pas expliquer cette différence de la hauteur moyenne de la surface de la mer aux deux stations par l'effet des vents d'ouest prédominants.

La hauteur relativement grande du niveau de la mer à la ville de Korsør s'explique par l'arrêt que subit le courant marin venant du sud quand il se heurte contre les bas fonds à la proéminence près de Korsør. Les eaux qui parcourent, du sud au nord, le détroit entre les îles de Langeland et de Laaland vont justement dans une direction vers la côte aux environs de Korsør.

Pendant la période susnommée de vents faibles les observations faites aux phares flottants montrent que le courant du Grand Belt s'est constamment dirigé du sud au nord.

En général la direction du courant est variable, mais les courants du sud sont les plus fréquents.

D'autre part la hauteur moyenne du niveau de la mer à Slipshavn ne suit pas bien la marche du niveau de la mer de la partie nord du Kattegat jusqu'à la mer Baltique. La station de Slipshavn est située à l'entrée du Fjord de Nyborg dans lequel les courants du Grand Belt n'entrent pas. Il est donc à supposer que ces courants en entraînant l'eau par ses bords sont cause que le niveau de la mer à Slipshavn est un peu plus bas qu'il ne le serait, si ces courants n'avaient pas lieu.

Oscillations de la surface de la mer pendant des orages.
Pendant les orages les courbes maréographiques montrent en général à plusieurs stations des irrégularités particulières en forme d'une série de vagues d'une hauteur moyenne de 20 à 30^{cm}, mais qui atteignent quelquefois un mètre et plus. Ces vagues paraissent toujours subitement pour disparaître peu à peu. Le baromètre enregistreur de l'Institut météorologique de Copenhague montre que ces vagues d'orage de la mer viennent toujours quelque temps après les oscillations barométriques pendant un orage. Dans l'orage qui, le 5 août 1904, s'étendait sur tout le Danemark les vagues d'orage de la mer ont commencé, aux différentes stations maréographiques, aux heures suivantes:

à Copenhague	à 10 ^h du soir
„ Hornbæk	„ 9 „ „
„ Slipshavn	„ 7 „ „
„ Korsør	„ 7 ^{1/2} „ „
„ Gjedser	„ 7 „ „

A Fredericia et à Aarhus les courbes n'ont montré que de très petites oscillations, à Frederikshavn, à Hirshals et à Esbjerg la courbe n'était pas altérée.

Le baromètre enregistreur de l'Institut météorologique de Copenhague montra une grande oscillation d'orage à 9^h du soir.

Ces vagues d'orage n'apparaissent généralement qu'aux stations sud. A Hirshals et à Esbjerg on n'a pas observé de telles vagues.

Il semble donc que les vagues d'orage ne se produisent qu'aux stations situées auprès d'une mer intérieure et qu'elles sont l'effet d'une interférence de petites vagues réfléchies aux différentes parties des côtes et qui sont produites directement par des changements brusques de la pression atmosphérique pendant les orages.

Rettelser

Side 125, Linie 23: Ordene „et KINCH“ udgaar.

— 239, Nr. 25, Aar 1902, Station *Nykøbing F.* skal være: **København F.**