

Association des Elèves des Ecoles Spéciales
de l'Université de Liège.

Édition de cours

COURS
DE
GÉNIE MARITIME

Notes publiées avec l'autorisation de Monsieur le Professeur. ¶

1929

Introduction

Appendice au Cours d'Hydraulique fluviale.

Chapitre I. Mouvements ondulatoires périodiques -

1 Ondes d'oscillation - Nous avons étudié précédemment les ondes de translation, caractérisées par un déplacement déterminé des molécules liquides qui, après le passage de l'onde, ne se retrouvent pas à leurs positions initiales. Dans une eau calme, des vitesses et des débits prennent naissance du fait de l'onde de translation et dans l'étendue de celle-ci, mais sont nuls avant et après. Une onde d'oscillation a des caractères tout différents. En eau calme, les particules liquides décrivent des trajectoires fermées et reviennent donc périodiquement occuper les mêmes positions. Pour cette raison, ce mouvement a été appelé orbitaire - Le phénomène étant périodique, si l'on considère un temps assez long, à travers une section déterminée en eau calme, il n'y a pas de débit véritable, mais pulsation alternative avec débit total nul. A la surface libre, au lieu d'intumescences isolées et se déplaçant d'une manière indépendante, on trouve un ensemble d'ondulations dépendantes et continues, se propageant identiquement. La vitesse de propagation est appelée célérité. En fait le phénomène peut être compliqué par la combinaison des ondes d'oscillation avec un courant, ainsi que par les effets du vent, des compositions d'ondes ou interférences; des ondes de translation peuvent aussi se superposer aux mouvements oscillatoires. Bref, il peut se produire des mouvements ondulatoires de complexité insaisissable. De grands mathématiciens tels que M. Boussinesq ont poussé très loin l'étude théorique de ces mouvements, basée sur des hypothèses reflétant déjà un ensemble compliqué de conditions réelles. Mais, ainsi que le fait observer M. Flamant, les résultats obtenus doivent être considérés comme possibles, mais non nécessaires, ni même très probables, car on peut croire que les mouvements en diffèrent toujours plus ou moins dans la nature.

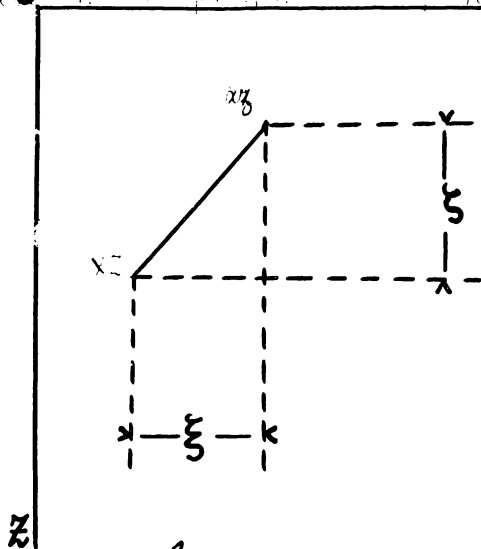
Nous nous bornerons donc à une analyse mathématique des cas élémentaires et en procédant à partir des lois d'observation, dont nous vérifierons l'ac-

cord avec les formules fondamentales d'hydrodynamique. Cette méthode est rigoureuse, elle est dépourvue de difficultés et d'artifices et est, à tout prendre, aussi convaincante que celle qui prendent les équations différentielles comme point de départ.

2. Houle cylindrique régulière en profondeur indéfinie - La surface libre possède à tout instant l'aspect d'un cylindre ondulé à génératrices horizontales. Tous les plans verticaux perpendiculaires à ces génératrices sont identiques. Considérons dans un de ces plans un axe vertical Oz et un axe vertical Ox confondu avec la surface libre dans l'état initial de repos.

La houle cylindrique régulière consiste en un mouvement périodique du liquide, dont toutes les particules décrivent des orbites dans le plan vertical xOz et tel que, sur une même horizontale, les mêmes circonstances: vitesses, pressions, etc. se reproduisent à des intervalles de temps proportionnels aux distances à Oz et périodiquement en chaque point. F. von Gerstner (Prague) a énoncé la première loi qu'en profondeur indéfinie, les orbites sont circulaires.

soit O l'origine des coordonnées x et z .



Appelons x et z les coordonnées moyennes, indépendantes du temps, ξ et ζ les déplacements et x et z les coordonnées instantanées d'une particule liquide. La houle en profondeur indéfinie répond aux équations:

$$x = X + \xi = X + h \sin \frac{\pi}{l} (Wt - X) e^{-\frac{\pi z}{l}}$$

$$z = Z + \zeta = Z - h \cos \frac{\pi}{l} (Wt - X) e^{-\frac{\pi z}{l}}$$

$2h$ est la différence de niveau entre le sommet et le creux de la houle,
 $2l$, la longueur d'onde,
 et W , la célérité.

Les vitesses sont

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{\pi h W}{l} e^{-\frac{\pi z}{l}} \cos \frac{\pi}{l} (Wt - X) x$$

$$w = \frac{dz}{dt} = \frac{\pi h W}{l} e^{-\frac{\pi z}{l}} \sin \frac{\pi}{l} (Wx - t)$$

Comme on peut négliger l'action du frottement, car l'expérience montre que la houle ne s'éteint que très lentement, on peut adopter les équations d'Euler

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{du}{dt} \qquad \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = g - \frac{dw}{dt}$$

Mais $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial x}$, $\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial z}$

D'où $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{du}{dt} \cdot \frac{\partial x}{\partial x} - \left(\frac{dw}{dt} - g \right) \frac{\partial z}{\partial x}$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = - \frac{du}{dt} \cdot \frac{\partial x}{\partial z} - \left(\frac{dw}{dt} - g \right) \frac{\partial z}{\partial z}$$

La première équation donne

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\pi h}{l} e^{-\frac{\pi z}{l}} \left[\sin \frac{\pi}{l} (Wx - t) \right] \left(\frac{\pi W^2}{l} - g \right)$$

à la surface libre, donc pour $z=0$, la pression est constante et égale à la pression atmosphérique p_a .

Donc $\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{z=0} = 0$

D'où $\frac{\pi W^2}{l} - g = 0$, $W = \sqrt{\frac{gl}{\pi}}$ et comme $W = \frac{l}{T}$.

La demi-période est

$$T = \sqrt{\frac{\pi l}{g}}$$

Il en résulte que $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ et que p est indépendant de x

La seconde équation donne, après développement, et en observant que $W^2 = \frac{gl}{\pi}$,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = g \left[1 - \frac{\pi^2 h^2}{l^2} e^{-\frac{2\pi z}{l}} \right] e^{-\frac{\pi z}{l}}$$

D'où, comme p est indépendant de x ,

$$p = p_a + \rho g \left[z + \frac{\pi h^2}{2l} e^{-\frac{2\pi z}{l}} \right] e^{-\frac{\pi z}{l}}$$

Remarquons que pour $z = \infty$, $\xi = 0$, e. à. d. que les déplacements verticaux sur le fond sont nuls.

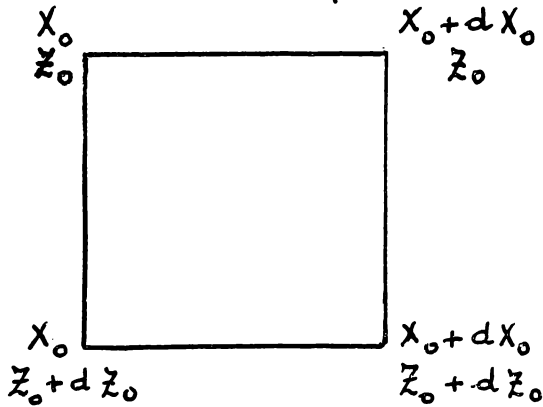
L'équation de continuité $\frac{du}{dx} + \frac{dw}{dz} = 0$ peut se vérifier.

fixe en exprimant les dérivées en fonction de X, Z et t . Il est plus rapide d'établir une nouvelle forme de l'équation de continuité, selon l'observation de M. de Besnecrais.

Considérons un rectangle élémentaire dont les positions initiales de deux sommets opposés sont

$$X_0, Z_0 \text{ et } X_0 + dX_0, Z_0 + dZ_0.$$

La surface initiale est $dX_0 dZ_0$. Après déformation, les coordonnées des sommets sont



$$X_0 + \xi,$$

$$Z_0 + \xi;$$

$$X_0 + dX_0 + \frac{d\xi}{dX_0} dX_0 + \frac{d\xi}{dZ_0} dZ_0,$$

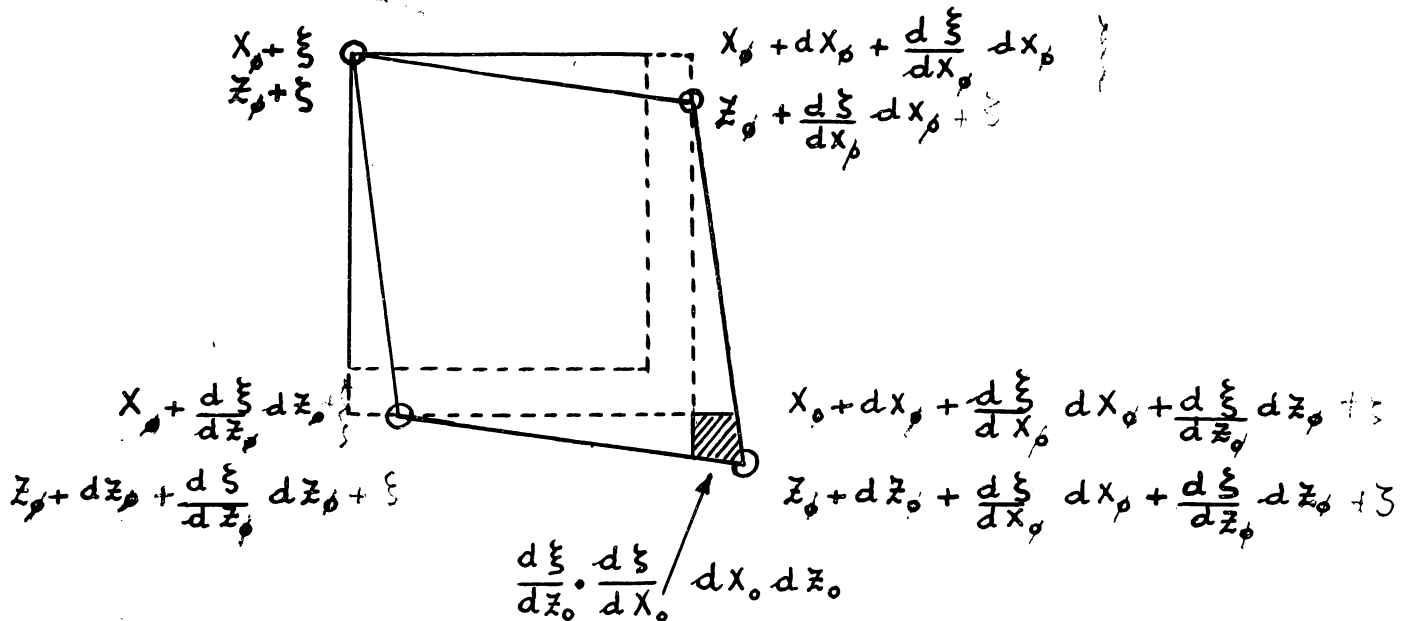
$$Z_0 + dZ_0 + \frac{d\xi}{dX_0} dX_0 + \frac{d\xi}{dZ_0} dZ_0;$$

$$X_0 + \frac{d\xi}{dZ_0} dZ_0,$$

$$X_0 + dX_0 + \frac{d\xi}{dX_0} dX_0,$$

$$Z_0 + dZ_0 + \frac{d\xi}{dZ_0} dZ_0;$$

$$Z_0 + \frac{d\xi}{dX_0} dX_0.$$



On voit aisément que la surface déformée a pour expression, en négligeant les infiniment petits d'ordre supérieur ?

$$(dX_0 + \frac{d\xi}{dX_0} dX_0)(dZ_0 + \frac{d\xi}{dZ_0} dZ_0) - \frac{d\xi}{dZ_0} dZ_0 \frac{d\xi}{dX_0} dX_0.$$

Cette expression doit être égale à $dX_0 dZ_0$ puisque

la surface ne s'est pas modifiée (continuité des liquides incompressibles). Donc

$$\left(1 + \frac{d\xi}{dx_0}\right) \left(1 + \frac{d\zeta}{dz_0}\right) - \frac{d\xi}{dz_0} \cdot \frac{d\zeta}{dx_0} = 1,$$

ou encore, d'après les équations précédentes :

$$\frac{dx}{dx_0} \cdot \frac{d\zeta}{dz_0} - \frac{dx}{dz_0} \cdot \frac{d\zeta}{dx_0} = \frac{1}{\dots}$$

Les équations précédentes se réfèrent aux positions initiales du liquide au repos. Par rapport aux positions moyennes,

$$\frac{dx}{dx} \cdot \frac{d\zeta}{dz} - \frac{dx}{dz} \cdot \frac{d\zeta}{dx} = \frac{dx_0}{dx} \cdot \frac{dz_0}{dz}$$

Or on trouve pour le premier membre $1 - \frac{\pi^2 h^2}{l^2} e^{-\frac{2\pi z}{l}}$ et il en résulte que

$$x = x_0 \text{ et } \frac{dz_0}{dz} = 1 - \frac{\pi^2 h^2}{l^2} e^{-\frac{2\pi z}{l}}$$

$$z_0 = z + \frac{\pi h^2}{2l} e^{-\frac{2\pi z}{l}}$$

La position moyenne doit se trouver à hauteur

$$\frac{\pi h^2}{2l} e^{-\frac{2\pi z}{l}} \text{ au-dessus de la position}$$

d'équilibre pour que la loi de continuité soit satisfaite. Or nous vérifierons qu'il en est bien ainsi.

Les particules liquides décrivent des orbites circulaires de rayon

$$r = \sqrt{\xi^2 + \zeta^2} = h e^{-\frac{\pi z}{l}}$$

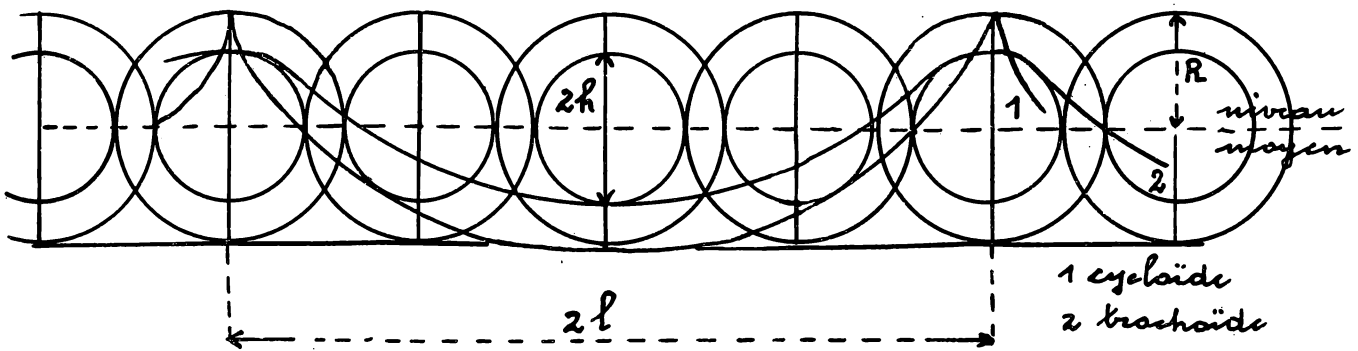
Le rayon vaut h pour les particules de la surface; il décroît très rapidement en profondeur suivant la loi exponentielle:

$$h e^{-\frac{\pi z}{l}}$$

Pour $\frac{z}{l} =$	0,1	0,5	1	2	3
$e^{-\frac{\pi z}{l}}$	0,730	0,208	0,043	0,0018	0,00008.

La courbe décrite est une trochoïde, c'est-à-dire la trajectoire d'un point situé à distance r du centre d'un cercle de rayon $\frac{l}{\pi}$ roulant sans glisser sur une parallèle à l'horizontale passant par le centre.

On bien encore, c'est la courbe décrite par un point parcourant la circonférence de cercle de rayon r à vitesse angulaire constante: $\omega = \frac{\pi}{T} = \frac{\pi W}{l}$ tandis que le centre de



ce cercle se déplace sur l'horizontale à une vitesse uniforme W . Lorsque $z = \frac{l}{\pi}$, $\omega z = W$, la trochoïde devient une cycloïde. C'est un cas limite qui ne peut se produire qu'à la surface, car nécessairement $z < \frac{l}{\pi}$, sinon la trochoïde présenterait des boucles et des points nodaux aux sommets des vagues.

Si la vitesse W devient très grande par rapport à ωz , ce qui correspond aux ondulations de très grandes longueurs, telles que celles des marées, la trochoïde devient pratiquement une sinusoïde.

Les équations de la surface libre sont, puisque $z=0$

$$x = X + h \sin \frac{\pi}{l} (Wt - X)$$

$$z = z_0 - h \cos \frac{\pi}{l} (Wt - X)$$

Le niveau d'équilibre initial correspond à l'horizontale moyenne de la trochoïde. On trouve pour l'aire d'une onde au-dessus de son point le plus bas $2l(h - \frac{\pi h^2}{2l})$.

Donc le niveau initial est situé à une profondeur $\frac{\pi h^2}{2l}$ sous le niveau moyen de la houle; les saillies d'une vague sont moins longues que les creux.

Pour les points de cote moyenne z , le niveau initial est donc bien

$$z_0 = z + \frac{\pi}{2l} h^2 e^{-\frac{2\pi z}{l}}$$

ce qui montre que la condition résultant de l'équation de continuité est bien satisfaite.

Or nous avons trouvé

$$p = p_a + \rho g \left[z + \frac{\pi h^2}{2l} e^{-\frac{2\pi z}{l}} \right]$$

Donc $p = p_a + \rho g z_0$.

Chaque molécule reste soumise en mouvement à la même pression qu'à l'état de repos, donc toutes

Les molécules situées initialement dans un même plan horizontal constituent à tout instant une surface de niveau, appelée surface d'onde et définie par les équations :

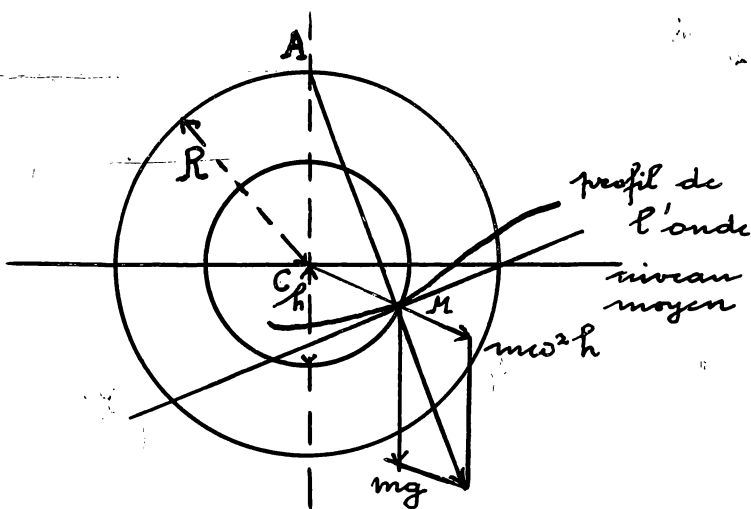
$$x = X + \xi, \quad z = Z + \zeta, \quad r = r_0 + \rho g Z_0, \quad Z_0 = Z + \frac{\rho h^2}{2l} e^{-\frac{2\pi Z}{l}}$$

3) Propriétés de la houle trochaïdale. Toutes les molécules décrivent des orbites circulaires à vitesse angulaire constante $\omega = \frac{\rho}{T} = \frac{\rho W}{l}$. Les rayons de ces cercles décroissent très rapidement lorsque l la profondeur augmente et d'autant plus que la houle est plus courte, c'est-à-dire que $\frac{l}{\rho} = R$ est plus petit.

Le centre du cercle est situé à hauteur $\frac{z^2}{2R}$ au-dessus de la position de repos. Les surfaces d'onde se déplacent toutes avec une vitesse uniforme $W = R\omega = \frac{l\omega}{\rho} = \frac{g}{\omega}$.

Si nous considérons la trochaïde résultant du roulement du cercle de rayon R et engendré par le point M à distance z du centre C , le point de contact A du cercle générateur est le centre instantané de rotation et AM est la normale au profil de l'onde. La poussée qui s'exerce sur la molécule M de masse m doit équilibrer le poids mg et la force d'inertie centrifuge $m\omega^2 z$. Les deux forces sont

dirigées suivant AC et CM . Comme $g = \frac{l\omega^2}{\rho} = AC\omega^2$, ces deux forces sont égales à $m\omega^2 AC$ et $m\omega^2 CM$, de sorte que leur résultante est dirigée suivant la normale AM et est égale à $m\omega^2 AM$. La poussée est donc normale aux surfaces de niveau et



vaut $m\omega^2 AM = mg \frac{AM}{AC}$. Elle varie donc entre $mg(1 - \frac{z}{R})$ aux crêtes et $mg(1 + \frac{z}{R})$ aux creux.

Si $z = R$, la poussée est nulle en crête; on est à la limite de déferlement. Correspond à une houle cycloïdale à la surface libre.

Les molécules qui sont situées au repos sur une même verticale se trouvent pendant le mouvement sur une cour-

be appelée verticale dynamique et définie par les équations:

$$x = X + \xi, \quad z = Z + \zeta$$

dans lesquelles il suffit de faire $X = c t^2$

Donc la longueur et la vitesse d'une houle sont liées par une relation indépendante de sa hauteur

$$W = \sqrt{\frac{lg}{\pi}} = \frac{l}{T}, \quad T = \sqrt{\frac{\pi l}{g}}$$

$$W\omega = g, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Une houle est entièrement définie par sa longueur d'onde et son rayon orbitaire en surface. Toute la masse liquide participant à la houle peut subir une translation horizontale sans frottement de fond, le phénomène n'en est pas altéré, sauf la vitesse de translation. Si la vitesse d'entraînement est $-W$, théoriquement la surface libre et les surfaces d'ondes ou de niveau seront fixes et l'écoulement prend le caractère d'un écoulement permanent de vitesse uniforme $-W$ suivant les surfaces d'onde:

Comme la vitesse d'une molécule est $v = \omega z$, son énergie cinétique est

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 z^2 = \frac{mg z^2 \pi}{2l}$$

L'énergie potentielle est égale au produit de mg par l'élevation moyenne au-dessus du niveau d'équilibre qui est

$$\frac{\pi h^2 e}{2l} = \frac{2\pi z'}{l} = \frac{\pi z^2}{2l}; \text{ donc elle est } \frac{mg \pi z^2}{2l}$$

c'est-à-dire égale à l'énergie cinétique.

Pour une tranche de houle de longueur $2l$, c'est-à-dire une vague de largeur égale à l'unité, l'énergie totale sur toute la profondeur est

$$E = 4\omega l \int_0^{\infty} \frac{\pi}{2l} z^2 dz = 2\pi \omega h^2 \int_0^{\infty} e^{-\frac{2\pi z'}{l}} dz = 2\pi \omega h^2 \left[-\frac{l}{2\pi} e^{-\frac{2\pi z'}{l}} \right]_0^{\infty}$$

$$E = \omega h^2 l \text{ pour toute la profondeur de l'eau.}$$

On se rend compte aisément, par la rapidité de la décroissance de $e^{-\frac{2\pi z'}{l}}$ que la majeure partie de l'énergie est concentrée vers la surface; on peut considérer qu'elle est contenue presque toute entière dans la tranche de profondeur $z' = l$, puisque pour $\frac{z'}{l} = 1$,

$$e^{-\frac{2\pi z'}{l}} = 0,0018.$$

D'autre part, la profondeur n'est jamais infinie; il doit en résulter une perturbation. Vu la décroissance très rapide de r avec la profondeur, il est certain que l'influence du fond doit être très négligeable tant que $\frac{H}{l}$ est assez grand, H étant la profondeur. Si la profondeur est faible, M. Boussinesq a montré, en supposant h petit par rapport à l , que l'on peut représenter le phénomène par un mouvement orbitaire elliptique. Les grands axes des ellipses sont horizontaux. L'onde est formée d'une trochoïde elliptique. La valeur du demi-grand axe est

$$r = h \frac{\operatorname{coth} \pi \frac{H-z'}{l}}{\operatorname{sinh} \pi \frac{H}{l}}$$

La valeur du demi-petit axe (vertical) est

$$r' = h \frac{\operatorname{sinh} \pi \frac{H-z'}{l}}{\operatorname{sinh} \pi \frac{H}{l}}$$

en désignant par $\operatorname{sinh} x$, $\frac{e^x - e^{-x}}{2}$; par $\operatorname{coth} x$, $\frac{e^x + e^{-x}}{2}$

Donc $\frac{r}{r'} = \frac{1}{\operatorname{tgh} \pi \frac{H-z'}{l}}$. A la surface $\frac{r_0}{r'_0} = \frac{1}{\operatorname{tgh} \pi \frac{H}{l}}$

Le rapport $\frac{r}{r'} \cong 1$ dès que $\frac{H-z'}{l} > 1,40$. La célérité est

$$W = \frac{l}{T} = \sqrt{\frac{gl}{\pi} \operatorname{tgh} \pi \frac{H}{l}}$$

Donc, dès que $\frac{H}{l} > 1,40$, on retrouve $W = \sqrt{\frac{gl}{\pi}}$, célérité relative aux grandes profondeurs.

Pour les petites profondeurs, tant que $\frac{H}{l} < 0,20$, on a très approximativement

$\operatorname{tgh} \pi \frac{H}{l} = \frac{\pi H}{l}$, d'autant mieux que $\frac{H}{l}$ est plus petit. On obtient alors

$$W = \sqrt{gH}, \text{ c'est-à-dire la formule}$$

de Lagrange relative aux ondes allongées de faible hauteur.

Pour les profondeurs moyennes, on a des valeurs intermédiaires pour la célérité, que l'on peut calculer par le tableau suivant:

$\frac{H}{l} = 0$	0,02	0,06	0,10	0,15	0,20	0,50	0,80
$\operatorname{tgh} \pi \frac{H}{l} = 0$	0,063	0,186	0,304	0,439	0,557	0,878	0,987.

L'élevation du niveau moyen au-dessus du niveau d'équilibre est $\frac{\rho r r'}{2l}$ et l'énergie de l'onde a encore pour expres-

sion
$$\bar{w} h^2 l = \rho \pi r r' W^2$$

Enfin nous avons vu que théoriquement, l'onde est stable en surface tant que $h < \frac{L}{\pi}$; à la limite, son profil affecte une forme de cycloïde à points de rebroussement. Mais il apparaît clairement que les ondes doivent déformer longtemps avant d'atteindre cette forme limite ; elles ne sont donc stables que si h est sensiblement $< \frac{L}{\pi}$.

L'aplatissement des orbites lorsque la profondeur devient faible montre que le déplacement se produit plus rapidement aux faibles profondeurs. Comme nous l'avons montré pour les ondes de translation, ce déplacement se produit surtout lorsque les ondes venant du large gravissent, au voisinage des côtes, des plages en pente douce. Le frottement du fond retarde la base de l'onde qui se rompt vers l'avant, en dissipant son énergie en tourbillons et chaos.

Des ondes peuvent cependant déformer vers l'arrière, lorsqu'elles se propagent en sens inverse d'un courant plus rapide en surface que dans le fond. C'est alors la tête qui est plus retardée que la base, reste en arrière, et finit par être en déséquilibre et déformer. Le phénomène peut se produire par exemple à l'embranchure des fleuves.

5 Composition des houles. Comme l'a montré M. Boussinesq, les équations de la houle que nous avons considérées correspondent à celle dont les déplacements sont petits par rapport à la longueur d'onde. Dans ces conditions, la composition de houles différentes peut se faire par la superposition des petits mouvements simples. Il est d'ailleurs nécessaire que h soit très petit car la houle simple a son plan moyen à $\frac{\pi h^2}{2l}$ au-dessus du niveau d'équilibre. Les plans moyens des diverses houles ne sont donc pas communs si h est différent ; il faut que h soit petit pour que les écarts soient négligeables. Nous envisagerons d'ailleurs surtout des houles de même hauteur ou de hauteurs fort peu différentes. Les équations que nous obtiendrons de la sorte sont les plus simples qui conviennent aux phénomènes complexes étudiés. Selon certains auteurs, tels que M. Le Berneris, elles sont mêmes insuffisamment approximatives et il faut recourir à l'analyse harmonique. Comme notre but est surtout de donner une interprétation mathématique simple compatible avec les phénomènes physiques, nous nous en tiendrons à l'approximation indiquée.

Un cas simple intéressant correspond à la superposition de deux houles de même hauteur h , et dont les len-

groupes d'ondes et les périodes diffèrent peu, de telle sorte que

$$l_1 = l - \alpha \quad , \quad l_2 = l + \alpha .$$

$$T_1 = T - \beta \quad , \quad T_2 = T + \beta$$

$$x = X + h e^{-\frac{\pi z'}{l}} \left[\sin \pi \left(\frac{t}{T - \beta} - \frac{X}{l - \alpha} \right) + \sin \pi \left(\frac{t}{T + \beta} - \frac{X}{l + \alpha} \right) \right]$$

$$z' = z' - h e^{-\frac{\pi z'}{l}} \left[\cos \pi \left(\frac{t}{T - \beta} - \frac{X}{l - \alpha} \right) + \cos \pi \left(\frac{t}{T + \beta} - \frac{X}{l + \alpha} \right) \right]$$

$$z' = z' - 2h e^{-\frac{\pi z'}{l}} \cos \pi \left(\frac{t}{T} - \frac{X}{l} \right) \cos \pi \left(\frac{\beta t}{T^2} - \frac{\alpha X}{l^2} \right)$$

La hauteur maximum des vagues est doublée. Il y a deux célérités à considérer : la première, fondamentale, est celle de la hauteur moyenne $W = \frac{l}{T}$; la seconde résulte du 2^e cosinus et est :

$$W' = \frac{l^2}{\alpha} / \frac{T^2}{\beta} = \frac{l^2}{T^2} \cdot \frac{\beta}{\alpha}$$

$$\text{Or } W^2 = \frac{l^2}{T^2} = \frac{g l}{\pi} \quad ; \quad \frac{\beta}{\alpha} = \frac{dT}{dl} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{lg}} = \frac{W}{2}$$

$$\text{D'où } W' = \frac{W}{2}$$

Donc à un instant quelconque la surface libre sera formée d'une succession de groupes ou trains d'ondes, de longueur totale $\frac{2l^2}{\alpha}$, dont les hauteurs varieront de 0 à $2h$ et vaudront pour chacune d'elle $2h \cos \pi \left(\frac{\beta t}{T^2} - \frac{\alpha X}{l^2} \right)$

Les vagues de longueur $2l$ avancent avec une célérité W , tandis que les maxima se déplacent avec une célérité $W/2$. Donc on verra à la surface s'avancer des trains d'ondes dans lesquels les vagues elles-mêmes avancent avec une vitesse double.

6 Clapotis. Quand une houle vient frapper sur un mur vertical supposé de profondeur infinie et perpendiculaire à la direction de propagation de la houle, celle-ci se réfléchit. La houle réfléchie se compose avec la houle incidente et produit le clapotis : les vagues paraissent immobiles, mais semblent monter et descendre sur place. Notamment, près du mur, les déplacements doivent être purement verticaux.

En première approximation, on peut considérer la hauteur réfléchie comme égale et de sens contraire à la houle incidente

Donc lors

$$x = X + h e^{-\frac{\rho Z'}{l}} \left[\sin \frac{\rho}{l} (WX - X) - \sin \frac{\rho}{l} (WX + X) \right]$$

$$= X - 2h e^{-\frac{\rho Z'}{l}} \cos \frac{\rho}{l} WX \sin \frac{\rho X}{l}$$

De même

$$z' = Z' - 2h e^{-\frac{\rho Z'}{l}} \cos \frac{\rho}{l} WX \cos \frac{\rho X}{l}$$

D'où $\frac{Z'}{Z} = \cos \frac{\rho X}{l} = \cos \frac{\rho X}{l}$ pour un point déterminé.

Donc les trajectoires sont des segments de lignes droites, d'inclinaison périodiquement variable. Ce sont des verticales pour $X=0$ contre le mur du quai, puis $X=2l, 4l$, etc. Pour $X=l, 3l$, etc., ce sont des horizontales. Intermédiairement, les inclinaisons varient régulièrement. On a

$$\xi^2 + \zeta^2 = 4h^2 e^{-\frac{2\rho Z'}{l}} \cos^2 \frac{\rho X}{l}$$

Donc tous les points dont les positions moyennes sont dans un même plan horizontal ont des déplacements de même amplitude

$4h e^{-\frac{\rho Z'}{l}}$, quelle que soit la direction de la trajectoire.

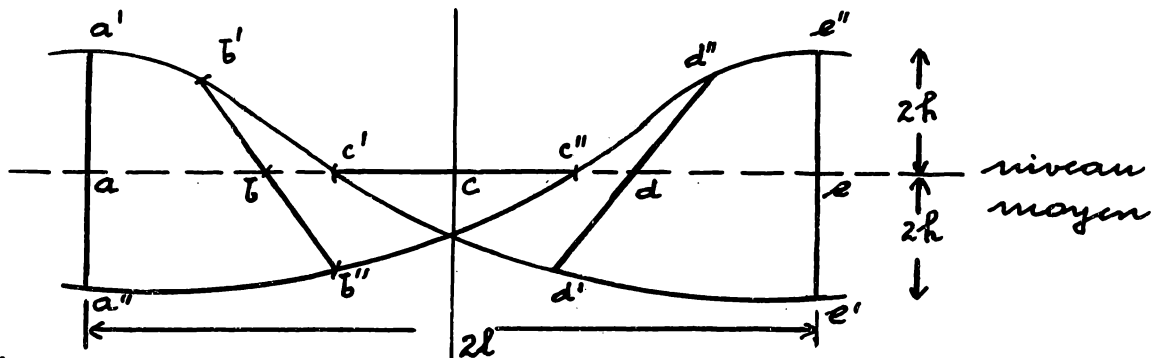
La hauteur des ondes clapoteuses est donc double de celle de la houle initiale.

La courbe de la surface libre est

$$x = X - 2h \cos \frac{\rho}{l} WX \sin \frac{\rho X}{l}$$

$$z' = -2h \cos \frac{\rho}{l} WX \cos \frac{\rho X}{l}$$

Comme h est petit par rapport à l , ces équations représentent une cycloïde allongée.



Le clapotis défini est le clapotis simple. Il se modifie par amortissement, comme la houle régulière. La loi d'amortissement est, d'après M. Nau

$$h = h_0 e^{-\frac{2 \varepsilon \rho^2}{\rho l^2} X}$$

Et étant le coefficient de viscosité. Il en résulte encore l'extinction plus rapide des ondes les plus courtes. Comme des causes perturbatrices nombreuses interviennent d'ordinaire dans le mouvement des ondes clapoteuses, elles n'ont pas le caractère de permanence de la houle, et s'amortissent en fait beaucoup plus vite.

L'énergie des ondes clapoteuses est double de celle de la houle initiale. Le déferlement des ondes clapoteuses est fréquent, à cause de leur grande hauteur, d'autant plus que les houles donnant naissance au clapotis dans les ports sont plus exarpées que celles du large. La grande énergie des ondes accroît aussi l'instabilité, ainsi que les profondeurs en général faibles au pied des murs. Il semble que la limite de déferlement soit $\frac{\pi h}{l} = 0,55$. Donc si la houle initiale est assez creuse, il se produit des projections verticales d'eau aux crêtes des ondes clapoteuses, ce qui s'observe souvent.

Observons d'ailleurs que la perte d'énergie de la houle initiale par suite de la réflexion sur le mur trouble le phénomène. Si h_1 est la hauteur de la houle initiale, la houle réfléchie est de hauteur $h_2 < h_1$. Dès lors

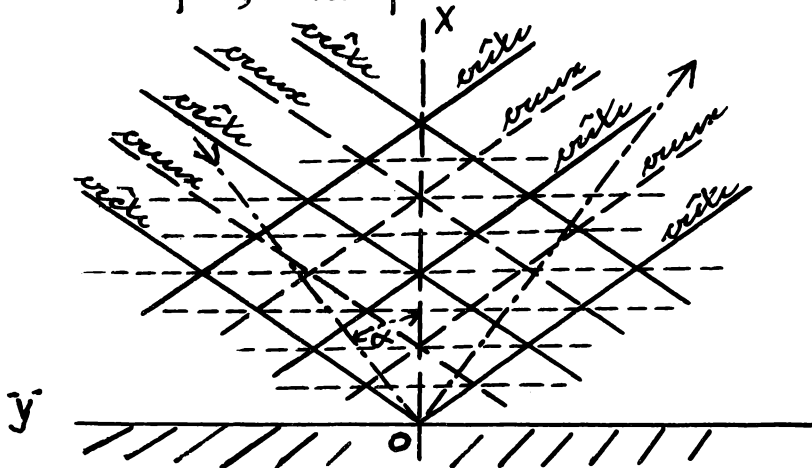
$$x = X + \left[h_1 \sin \frac{\pi}{l} (Wt - X) - h_2 \sin \frac{\pi}{l} (Wt + X) \right] e^{-\frac{\pi z'}{l}}$$

$$z' = z' - \left[h_1 \cos \frac{\pi}{l} (Wt - X) + h_2 \cos \frac{\pi}{l} (Wt + X) \right] e^{-\frac{\pi z'}{l}}$$

En éliminant X entre ces équations, on trouve des orbites elliptiques, dont les éléments dépendent de X et de z' . On peut considérer le phénomène comme la superposition d'un clapotis et d'une houle simple. En effet, supposons $h_1 > h_2$ et posons $h_1 = h_2 + \Delta h$. D'où

$$z' = z' - \left[2h_2 \cos \frac{\pi X}{l} \cos \frac{\pi X}{l} + \Delta h \cos \frac{\pi}{l} (Wt - X) \right] e^{-\frac{\pi z'}{l}}$$

Il y a un clapotis simple d'amplitude $4h_2$ et de célérité nul et une houle simple, d'amplitude $2\Delta h$ et de célérité W . La



période commune est $2T$. Les vagues se déplacent et leur hauteur varie du petit axe de l'ellipse (au creux du clapotis) au grand axe de l'ellipse (aux crêtes du clapotis) Intermédiairement, les axes de l'ellipse sont inclinés et varient régulièrement.

] Gaufrage. Le gaufrage se produit lorsque une houle régulière se réfléchit sur une paroi oblique à sa direction de propagation. Les deux houles réfléchie et incidente se croisent. Au point de croisement des crêtes, il y a une montée double en forme de cloche et au croisement des creux, un creusement double. La surface ainsi ondulée se déplace parallèlement à l'obstacle réfléchissant. En considérant celui-ci comme axe des y et la normale comme axe des x , on aura, en admettant l'égalité de l'angle d'incidence et de l'angle de réflexion et en appelant α l'angle de la houle avec la normale au mur:

$$z' = z - 2h \cos \frac{\pi}{\lambda} (Wx + Y \sin \alpha) \cos \frac{\pi}{\lambda} X \cos \alpha.$$

8. Observations sur la houle. La houle prend naissance dans la mer par l'action du vent, qui produit une ondulation plus ou moins régulière de la surface, formée de vagues ou lames. Lorsque le vent cesse, la masse liquide restant soumise à la seule influence de la pesanteur, de la force d'inertie et des frottements internes, les ondulations persistent en prenant une forme de plus en plus régulière constituant la houle.

La houle simple ne pourra approximativement se réaliser qu'au large, loin des actions perturbatrices des côtes et des hauts fonds; elle sera d'autant plus régulière que la direction et la vitesse du vent auront été constantes sur une plus grande étendue.

Si l'on immerge un corps dans une eau houleuse, il participe au mouvement de l'eau ^{au niveau} de son centre de gravité. Loin de la houle s'atténue rapidement en profondeur, une longue perche lestée flottant verticalement dans l'eau sera sensiblement immobile. Une flotteur mobile le long de cette perche suit les fluctuations de la surface. C'est le principe du traceur de l'amiral Paris, qui enregistre les déplacements du flotteur, convenablement réduits, sur un tambour tournant d'un mouvement continu.

On peut aussi observer d'un navire l'intervalle de passage de deux crêtes successives en un point et le temps que met une crête à parcourir la longueur du bateau. En tenant compte de la vitesse du navire et de la direction de sa

route par rapport à la houle, on peut en déduire l et T .

On a constaté que la relation $T = \sqrt{\pi l / g}$ est convenablement satisfaite. Le tableau suivant donne, d'après l'amiral Târis, les houles moyennes des différentes mers

Alizés de l'Atlantique	$2T = 6''$	$2l = 65m$	$2h = 1,90$	$\frac{h}{l} = 0,029$
Atlantique Sud	$9''5$	$133m$	$4,30$	$0,032$
Mer des Indes Sud	$7''6$	$96m$	$2,80$	$0,029$
Mers de Chine et du Japon	$7''$	$79m$	$3,20$	$0,040$
Pacifique Ouest	$8''2$	$102m$	$3,10$	$0,030$

Exceptionnellement, on a trouvé dans l'Atlantique Nord
 $2T = 23 \text{ sec.}$, $2l = 824m$, $W = 36m$ (amiral Motley)

Le maximum constaté par l'amiral Târis est

$2T = 19 \text{ sec.}$, $2l = 500m$, $W = 26,30m$.

$2T$ dépasse rarement 10 secondes ; $\frac{h}{l}$ dépasse rarement 0,05, ce qui correspond à $\frac{h}{R} = 0,16$. On a observé exceptionnellement $\frac{h}{R} = 0,10$; d'où $\frac{W}{R} = 0,3$ environ. Le clapotis et le gauchage observés dans la nature sont généralement trop complexes pour vérifier les théories simples exposées ; on a pu les réaliser en bassins expérimentaux et observer les trajectoires des particules par la stroboscopie.

9 Seiches des lacs. Il peut se produire dans les lacs des clapotis de grande longueur appelés seiches et qui ont été observés notamment sur le lac de Genève par le professeur Forel. Les équations du clapotis en profondeur finie sont

$$x = X - 2h \frac{\cosh \frac{\pi(H-z')}{l}}{\sinh \frac{\pi H}{l}} \cos \frac{\pi}{l} Wt \sin \frac{\pi X}{l}$$

$$z' = Z' - 2h \frac{\sinh \frac{\pi(H-z')}{l}}{\sinh \frac{\pi H}{l}} \cos \frac{\pi}{l} Wt \cos \frac{\pi X}{l}$$

Une seiche se produira si $l = \frac{L}{n}$, n étant un nombre entier peu élevé, parfois l'unité.

La demi-période est $T = \frac{l}{W} = \sqrt{\frac{\pi l}{g \tanh \frac{\pi H}{l}}} = \sqrt{\frac{\pi L}{g n \tanh \frac{\pi n H}{L}}}$

comme $\frac{H}{L} = \frac{nH}{L}$ est généralement très faible dans les grands

lacs, on trouve pratiquement la formule de Lagrange pour la célérité

$$W = \sqrt{\frac{g l}{\pi} \operatorname{tgh} \frac{\pi H}{l}} \equiv \sqrt{g H}.$$

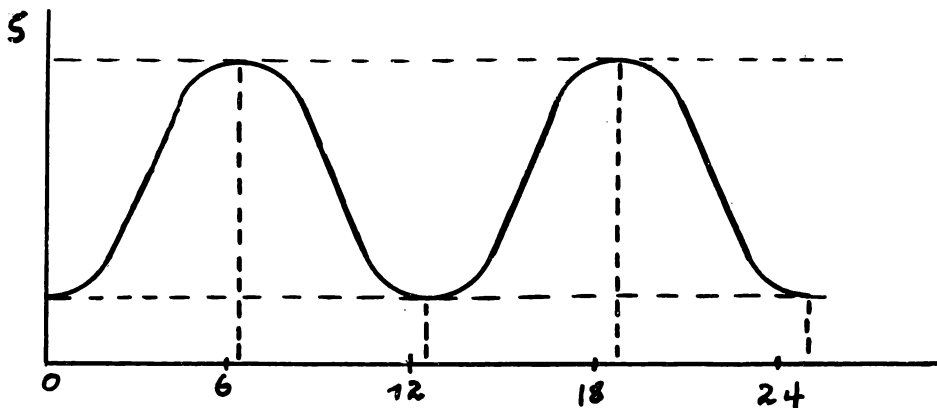
Les formules précédentes ont été vérifiées au lac Léman avec une exactitude suffisante. Il y a des seiches longitudinales de 73 minutes de périodicité et de 35 minutes; elles correspondent à $l = L$ et à $l = L/2$. Il y a des seiches transversales de 10 minutes. Celles de 73 minutes ont 1,20 à 1,50 m. de hauteur; celles de 10 m., 0,12 m. seulement. On attribue ces phénomènes à des inégalités de répartition de la pression atmosphérique.

Chapitre II. Marées et courants de marées.

1 Phénomène et observation locale des marées de la mer.

Dans la plupart des mers se produit le phénomène de marée que l'on observe, près des côtes, par une variation périodique du niveau moyen de la surface de l'eau entre un maximum et un minimum. La période est sensiblement semi-diurne, en moyenne 12 h 25'. La marée retarde donc d'un jour à l'aube d'environ 50' (retard journalier du passage de la lune au méridien)

Si l'on trace en fonction du temps une courbe de variation du niveau de l'eau, on obtient une courbe locale de marée. Elle a généralement une allure sinusoïdale plus ou moins régulière, selon les circonstances locales. Le minimum correspond



à la marée basse, le maximum à la marée haute. La différence constitue l'amplitude de la marée.

Lorsque la mer monte, il y a flot, flux montant ou gagnant.

Lorsque la mer descend, il y a reflux, ébc, jusant ou portant.
 Les courbes locales ont toujours sensiblement la même allure, mais leur amplitude varie périodiquement. La période est d'une lunaison ($29 \text{ jours } \frac{1}{2}$) ^{opposition et conjonction}. Les maxima se produisent aux syzygies (nouvelle et pleine lune), les marées sont dites de vive eau. Les minima se produisent aux quadra-
turs (premier et dernier quartiers), les marées sont dites de morte eau. Enfin les maxima de vive eau et les minima de morte eau varient périodiquement avec une période d'un an. (période solaire) Les marées de vive eau d'équinoxe et de morte eau d'équinoxe sont plus fortes et plus faibles que toutes les autres.

Malgré ces variations, la mer moyenne, c'est-à-dire le niveau moyen entre la marée haute et la marée basse, reste sensiblement constante en un point déterminé.

En un point déterminé (généralement un port), on distingue divers niveaux caractéristiques :

P H M	plus haute mer
H M V E E	haute mer de vive eau d'équinoxe.
H M V E M	" " " " " moyenne.
H M M E M	" " " morte " "
B M M E M	basse " " " " "
B M V E M	" " " vive " "
B M V E E	" " " " " d'équinoxe
P B M	plus basse mer.

À vrai dire, on devrait envisager les niveaux moyens des marées d'équinoxe. Les basses mers de vives eaux ou les plus basses mers sont généralement de zéro de nivellement pour les cartes marines et même terrestres.

C'est ainsi que le zéro du nivellement général de la Belgique est défini par le niveau moyen des basses mers de vive eau à Ostende.

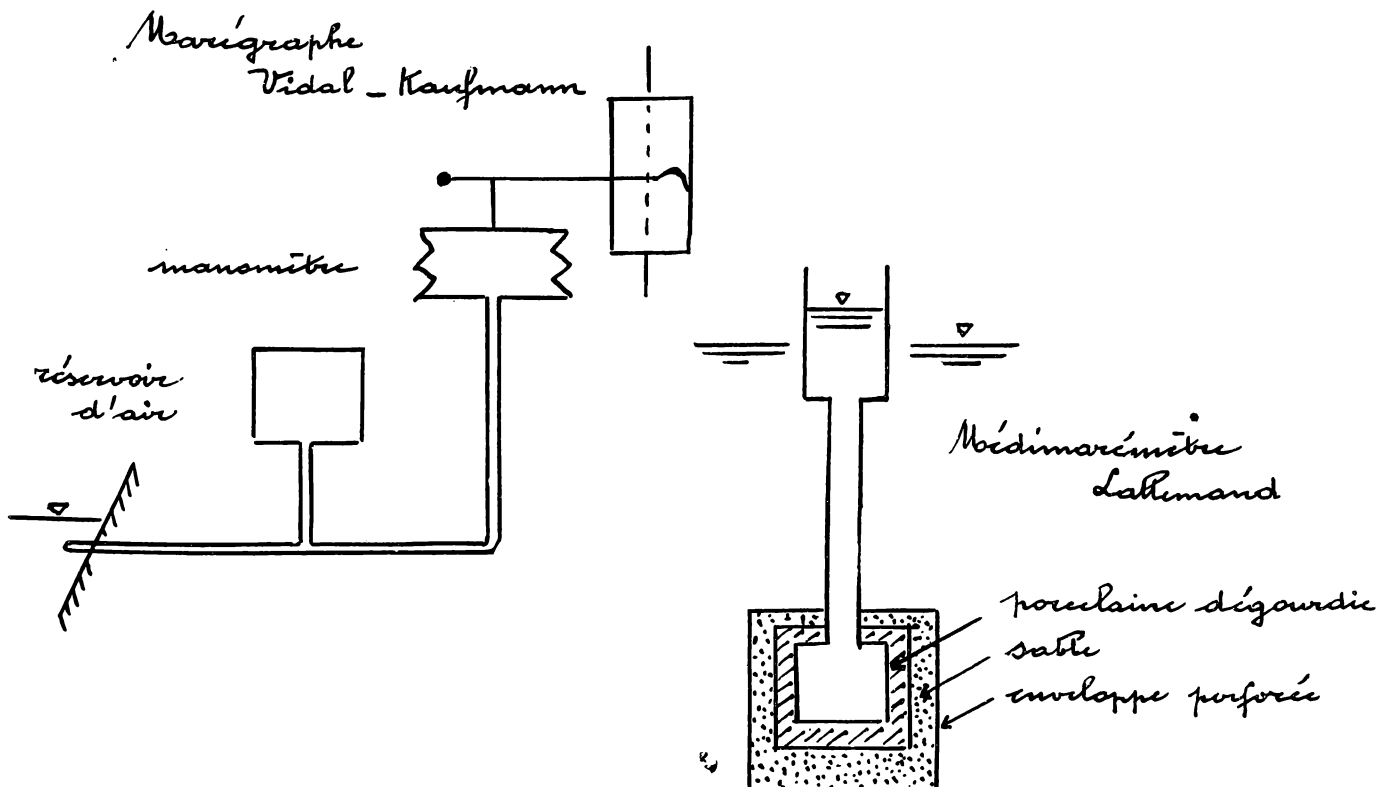
D'après ces éléments d'observation en relation avec les circonstances géographiques du lieu et les éléments astronomiques, on définit certains caractéristiques servant principalement à la prévision des marées. Je ne citerai que les notions les plus utiles pour l'ingénieur.

On appelle unité de hauteur d'un lieu, la hauteur au-dessus du niveau moyen de la pleine mer maximum après une syzygie, le soleil et la lune étant à la fois

dans l'équateur et à leurs distances moyennes de la terre. La plus forte marée se produit en effet généralement quelques jours (1 ou 2, parfois jusqu'à 4 jours) après la syzygie ; ce retard s'appelle l'ége de la marée

Le coefficient d'une marée quelconque est le rapport de l'élévation de la pleine mer au-dessus du niveau moyen, à l'unité de hauteur. On le rapporte souvent à 100. Le coefficient des vives eaux moyennes est 94, celui des mortes eaux moyennes 45. Les coefficients extrêmes sont 118 et 23 - de l'unité de hauteur.

Les observations de marée se font au moyen des marégraphes, du même type que les pluviographes enregistrés à flotteurs ou à manomètres. Les flotteurs doivent être établis dans des puits à l'abri des agitations superficielles. L'installation des marégraphes à flotteurs peut être incommode, à cause du déplacement important de la baignoire d'eau de marée haute à marée basse. Le marégraphe Vidal et Kaufmann remédie ingénieusement à cet inconvénient. Il comporte un manomètre enregistrant la pression d'air d'un réservoir nécessaire pour produire un écoulement d'air très lent par un tube dont l'orifice est toujours noyé sous marée basse



Le minimacémètre Lattmann indique les fluctuations très faibles du niveau moyen. Il comporte un vase communiquant avec la mer par l'intermédiaire d'une enveloppe poreuse très peu perméable. De la sorte, les oscillations de marée n'influencent presque pas le niveau de l'eau à l'intérieur du tube, qui indique le niveau moyen.

2 Notions théoriques sur le phénomène des marées.

On démontre que l'action attirante d'un astre sur une particule matérielle de masse m à la surface de la terre dérive d'un potentiel de la forme

$$\Phi = \mathcal{A}m \left[f(\lambda, \delta) + \sin 2\lambda \sin 2\delta \cos H + \cos^2 \lambda \sin^2 \delta \cos 2H \right],$$

\mathcal{A} étant une constante dépendant de l'astre envisagé. λ est la latitude du lieu, δ la distance polaire de l'astre et H son angle horaire.

En effet, en désignant par Δ la distance de l'astre L au centre C de la terre, R le rayon terrestre et θ l'angle MCL , l'action de L sur la masse m au point M dérive du potentiel

$$\phi_1 = \frac{K^2 m}{ML} = \frac{K^2 m}{\sqrt{\Delta^2 + R^2 - \Delta R \cos \theta}} = \frac{K^2 m}{\Delta} \left[1 + \rho \cos \theta + \rho^2 \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} \right]$$

en posant $\rho = \frac{R}{\Delta}$

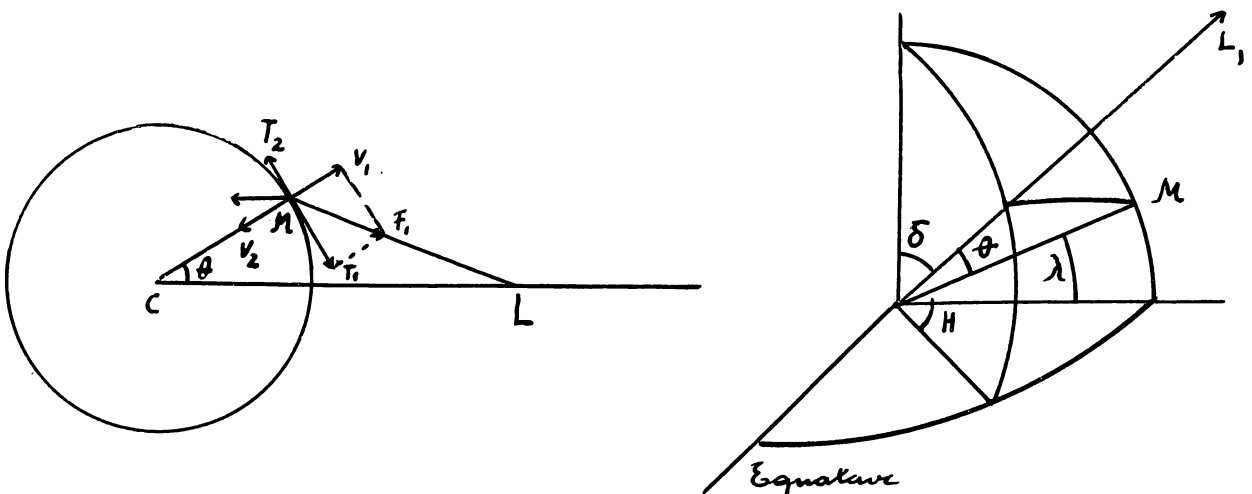
Il en résulte une action verticale

$$V_1 = \frac{\partial \phi_1}{\partial R} = \frac{K^2 m}{\Delta^2} \left[\cos \theta + \rho (3 \cos^2 \theta - 1) \right],$$

et une action tangentielle dans le sens des angles décroissants :

$$T_1 = \frac{1}{R} \frac{\partial \phi_1}{\partial \theta} = \frac{K^2 m}{\Delta^2} \left[\sin \theta + 3\rho \sin \theta \cos \theta \right].$$

ligne des pôles



Nous devons considérer les effets relatifs par rapport à la portion solide du globe; nous devons donc retrancher des expressions précédentes les composantes de la force $\frac{K^2 m}{\Delta^2}$ parallèle à LC , c'est-à-dire $V_2 = \frac{K^2 m}{\Delta^2} \cos \theta$ et $T_2 = \frac{K^2 m}{\Delta} \sin \theta$.

Les actions dérivent d'un potentiel

$$\phi_2 = \frac{K^2 m R}{\Delta^2} \cos \theta = \frac{K^2 m p}{\Delta} \cos \theta.$$

Il en résulte que le potentiel relatif est

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{K^2 m}{\Delta} \left[1 + p^2 \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} \right]$$

Or, d'après la trigonométrie sphérique,

$$\cos \theta = \sin \lambda \cos \delta + \cos \lambda \sin \delta \cos H.$$

On en déduit finalement

$$\Phi = \frac{3K^2 m R^2}{4 \Delta^3} \left[f(\lambda, \delta) + \sin 2\lambda \sin 2\delta \cos H + \cos^2 \lambda \sin^2 \delta \cos 2H \right]$$

(Démonstration de M. Bouasse)

δ varie avec une longue période (un an pour le soleil, $27\frac{1}{2}$ jours pour la lune). Les termes en δ donnent donc une variation périodique à longue période. La période de variation de H est d'un jour; les termes en $\cos H$ produisent la variation diurne; ceux en $\cos 2H$, la variation semi-diurne.

Les forces agissant sur la particule sont:

suivant la verticale $V = \frac{\partial \phi}{\partial R}$,

suivant la tangente au méridien $T = \frac{1}{R} \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}$.

suivant la tangente au parallèle $T' = \frac{1}{R \cos \lambda} \frac{\partial \phi}{\partial H}$

R étant la distance au centre de la terre.

La réduction de la pesanteur résultant de V est insensible; c'est la force tangentielle, très petite également, qui produit les marées. Cette action ne peut produire au centre d'un très vaste bassin maritime, qu'une très faible oscillation verticale, provenant d'un déplacement tangentiel périodique des eaux. Mais les côtes, en arrêtant le mouvement horizontal des eaux, produisent leur accumulation et leur élévation sur des hauteurs considérables. Elles produisent d'ailleurs des perturbations qui peuvent compliquer considérablement le phénomène. M. Hatt a donné l'expression suivante de la variation de niveau ζ au point considéré.

$$\zeta = A_0 + \frac{A_1}{\Delta^3} \sin \lambda \cos \delta \cos (H - \alpha_1) + \frac{A_2}{\Delta^3} \sin^2 \delta \cos 2(H - \alpha_2)$$

Δ étant la distance de l'astre au centre de la terre,

A_0 un terme à longue période dépendant de δ et très petit, A_1, A_2, α_1 et α_2 des constantes.

On voit que l'action des astres décroît rapidement selon leur distance. Il en résulte que c'est le plus rapproché, la lune, qui produit le plus d'effet. Le terme principal correspond à l'onde semi-divine dont la période pour la lune est 12 h. 25'. C'est la période moyenne d'un grand nombre de marées. Mais elles peuvent présenter des écarts marqués. Une des causes d'écart est la superposition de l'onde divine.

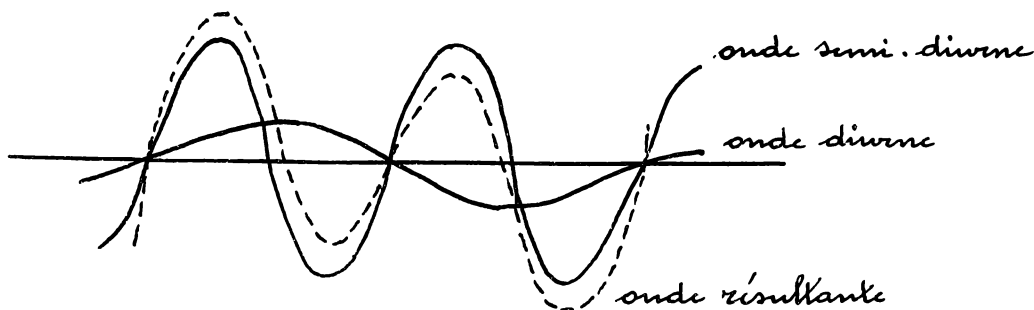
Les termes et coefficients $A_0, \frac{A_1}{\Delta_3} \sin \delta \cos \delta$ et $\frac{A_2}{\Delta_3} \sin^2 \delta$ varient avec la périodicité de $27\frac{1}{2}$ jours; ils ne produisent toutefois pas les variations d'amplitude des marées observées dans le cours d'une lunaison. Mais l'action du soleil se superpose à celle de la lune; elle en vaut environ le tiers. Sa période semi-divine est de 12 H, donc très voisine de celle de la lune. Sa variation à longue période est d'un an; son effet est faible vis-à-vis de la variation semi-divine. Le terme semi-divine des actions superposées de la lune et du soleil s'écrit

$$\begin{aligned} \xi &= B \cos 2(H - \alpha_2) + B' \cos 2(H' - \alpha_2') \\ &= B \cos 2H_1 + B' \cos 2(H_1 - \epsilon - \varphi) \end{aligned}$$

en posant $H - \alpha_2 = H_1$, $H' = H - \epsilon$ et $\varphi = \alpha_2' - \alpha_2$

On voit que ξ est une fonction périodique à amplitude variable, maximum lorsque $\epsilon + \varphi = n\pi$; alors $\xi = (B + B') \cos 2H_1$, et minimum lorsque $\epsilon + \varphi = \frac{2n+1}{2}\pi$; alors $\xi = (B - B') \cos 2H_1$.

Comme $B' = \frac{1}{3}B$, on voit que l'amplitude de l'oscillation varie entre la proportion de 4 aux syzygies et celle de 2 aux quadratures, dans une même lunaison. Cette amplitude varie d'ailleurs d'une période à l'autre à cause de la variation à longue période de B et B' . Mais c'est donc l'action combinée de la lune et du soleil qui produit la variation d'amplitude caractéristique des marées semi-divines sur nos côtes.



B' est plus grand aux équinoxes, d'où les fortes marées d'équinoxe, particulièrement si la lune est aussi près de l'équateur.

L'onde diurne correspond au terme $\frac{A_1}{\Delta_3} \sin \lambda \cos \delta$. La vive eau correspond aux conjonctions de la lune et du soleil, la morte eau aux oppositions. Le maximum ne correspond plus à $\delta = \frac{\pi}{2}$ (équinoxes) mais à $\delta = \frac{\pi}{4}$, qui ne peut se réaliser. Mais le $\frac{1}{2}$ phé nomène est donc d'autant plus fort que le soleil est plus haut au-dessus de l'équateur. Il est faible sur les côtes européennes et ne se manifeste qu'une fois dans le bassin du Pacifique, surtout par des différences entre les hauteurs et les niveaux de deux hautes mers consécutives; parfois par des écarts du même ordre pour les basses mers consécutives (Singapour) dans le Golfe du Bengale, le phénomène diurne subsiste seul.

Sur les côtes européennes, les variations de période du phénomène semi-diurne ne sont cependant pas dues au phénomène diurne, mais principalement à l'action combinée de la lune et du soleil. En effet la fonction

$$\xi = B \cos 2(H - \alpha_2) + B' \cos 2(H' - \alpha_2')$$

a une période différente de $\cos 2H$ et périodiquement variable. Elle peut en effet s'écrire:

$$y = C \cos 2(H_1 - \gamma), \text{ avec}$$

$$C^2 = B^2 + B'^2 + 2BB' \cos 2(\epsilon + \varphi)$$

$$\operatorname{tg} 2\gamma = \frac{B' \sin 2(\epsilon + \varphi)}{B + B' \cos 2(\epsilon + \varphi)}$$

Posons $2(H_1 - \gamma) = 2\pi(\omega - \lambda)t$, ω étant la pulsation fondamentale. La pulsation modifiée est $\Omega = \omega - \lambda = \omega - \frac{1}{\pi} \frac{d\gamma}{dt} =$

$$\omega - \frac{B'}{\pi C^2} \left[B \cos 2(\epsilon + \varphi) + B' \right] \frac{d\epsilon}{dt}.$$

Les extrêmes sont

$$\Omega_1 = \omega - \frac{B'}{\pi(B+B')} \cdot \frac{d\epsilon}{dt} = \omega - \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{d\epsilon}{dt}.$$

$$\Omega_2 = \omega + \frac{B'}{\pi(B+B')} \cdot \frac{d\epsilon}{dt} = \omega + \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{d\epsilon}{dt}$$

Pour la lune, $\omega = \frac{1}{2T} = \frac{1}{745}$ et $\epsilon = H - H' = \pi \left[\frac{1}{745} - \frac{1}{720} \right] t$,

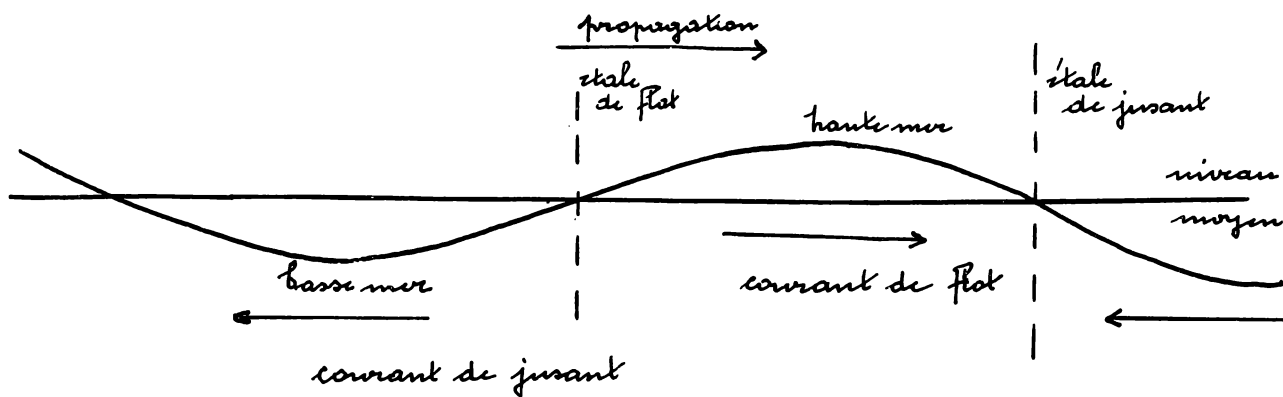
ce qui permet de calculer les limites ci-dessus.

En considérant les périodes lunaire et solaire de 745' et de 720', on trouve que la période combinée peut varier

entre un maximum de 757' et un minimum de 739'. La différence de phase entre le passage de la lune au méridien et la haute mer varie aussi d'après les positions relatives de la lune et du soleil et toutes ces variations sont les plus fortes aux équinoxes.

3 Propagation et caractères de l'onde de marée. Sous l'effet des actions indiquées, un mouvement ondulatoire prend naissance dans les bassins étendus des océans et se manifeste par le mouvement d'ondes de marées, qui s'accroissent près des côtes. Dans les petits bassins fermés, tels que la Méditerranée, la marée est à peine perceptible (amplitude maximum 0,25 m. à Marseille, 0,60 m. à Venise) Sur les côtes libres des grands bassins tels que l'Océan Atlantique, les courbes locales de marée ont une forme sinusoïdale assez régulière, correspondant à la théorie. On peut ainsi observer la célérité de l'onde et on trouve qu'elle satisfait très approximativement à la formule de Lagrange

$$W = \sqrt{gH}$$



L'énergie d'une onde d'oscillation telle que l'onde marée est très sensiblement égale à $\rho \pi h^2 W^2$. Abstraction faite des frottements, elle doit être constante, vu son origine sidérale, donc $h W = C^{te}$

En combinant avec la formule de Lagrange, on trouve $h \sqrt{H} = C^{te}$. M. Comay a indiqué la valeur 20 comme s'accordant bien avec les observations.

L'onde marée n'est pas toutefois une onde d'oscillation pure. On constate que la propagation de l'onde marée entraîne un certain déplacement alternatif de liquide. Au large, en mer libre et là où l'onde peut se propager librement, la vitesse des courants est constante sur toute la profondeur; on a vérifié ce fait sur plus de 100 m. de profondeur. Les maxima se produisent à la haute et à la basse mer (courants de flot et de jusant). Le renversement se produit à mi-marée et constitue un étale.

On distingue l'étale de flot après la haute mer et l'étale de jusant après la basse mer.

En appelant V la vitesse de courant, on a

$$V(H+h) = Wh ; \text{ d'où } V = h \sqrt{\frac{g}{H}}$$

Entre l'étale de jusant et l'étale de flot, une particule superficielle (flotteur) se déplace de $d = tV$.

Pendant ce temps, l'onde parcourt le chemin $l + d = tW$.

D'où $d = \frac{lV}{W-V} = \frac{lh}{H-h}$. L'observation vérifie cette relation d'

après M. Comoy. La propagation de la marée se représente au moyen de courbes cotidales, lignes tracées suivant le sommet de l'onde à des intervalles de temps réguliers (une heure). Elles sont assez régulières dans les grands bassins, au large et près des côtes régulières.

Les formules précédentes, encore qu'approximatives, montrent qu'à l'approche des côtes, où la profondeur décroît fortement, la célérité de l'onde marée diminue, mais sa hauteur augmente fortement, de même que la vitesse des courants et le déplacement des particules liquides.

En d'autres termes, l'onde marée acquiert de plus en plus un caractère d'onde de translation à mesure que la profondeur diminue.

4 Théorie élémentaire des courants de marée. Nous avons établi pour les ondes de translation l'équation

$$g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial t} \cdot \frac{H}{3} + \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Dans le cas de l'onde marée très étendue, nous pouvons nous borner à conserver deux termes principaux

$$g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} = g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0$$

$$\text{Mais } \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0. \text{ Or } q = H \frac{\partial \xi}{\partial t}, \quad \frac{\partial q}{\partial x} = H \frac{\partial^2 \xi}{\partial x \partial t}$$

$$\text{Donc } \frac{\partial \eta}{\partial t} + H \frac{\partial^2 \xi}{\partial x \partial t} = 0 \text{ et } \eta = -H \frac{\partial \xi}{\partial x};$$

$$\text{D'où } \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = gH \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}.$$

Comme le mouvement est entretenu par une force périodique que provenant des astres, nous devons ajouter un terme périodique et écrire

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{2g}{W^2 - gH} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + B \sin \frac{\pi}{\ell} (Wt - x)$$

Cette est l'équation de la propagation de l'onde marée dans un canal de largeur indéfinie à fond horizontal, sans courant préexistant. La force est périodiquement variable et son action se propage avec la célérité $W = \frac{\ell}{T}$, selon les notations relatives aux ondes d'oscillation.

Posons

$$y = t + \frac{x}{\sqrt{gH}} \quad z = t - \frac{x}{\sqrt{gH}}$$

On a

$$4 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x \partial z} = B \sin \frac{\pi}{\ell} \left[W \left(\frac{y+z}{2} \right) - \sqrt{gH} \frac{y-z}{2} \right]$$

D'où

$$\xi = F_1 \left(t + \frac{x}{\sqrt{gH}} \right) + F_2 \left(t - \frac{x}{\sqrt{gH}} \right) - \frac{B\ell^2}{\pi^2} \frac{1}{W^2 - gH} \sin \frac{\pi}{\ell} (Wt - x)$$

F_1 et F_2 sont des fonctions arbitraires n'influant pas sur les termes périodiques, que nous étudierons seuls. D'après les formules précédentes

$$\xi = -H \frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{B\ell H}{\pi} \frac{1}{W^2 - gH} \cos \frac{\pi}{\ell} (Wt - x)$$

$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{B\ell W}{\pi} \frac{1}{W^2 - gH} \cos \frac{\pi}{\ell} (Wt - x)$$

Si le canal fictif est établi suivant un parallèle de latitude λ , pour l'onde semi-diurne, la longueur d'onde de la marée est $2\ell = \pi R \cos \lambda$.

Nous voyons qu'en faisant abstraction des termes non périodiques, ξ et u sont maxima, minima et nuls en même temps ce qui correspond bien aux propriétés caractéristiques des courants de marée provenant d'ondes d'oscillation seules. Mais les termes arbitraires qui correspondent à la superposition d'ondes de translation peuvent modifier ces propriétés, ce qui se produit réellement au voisinage des côtes et surtout dans les bras de mer et près des îles.

5 Interférence des ondes-marées. L'interférence des ondes marées est une des causes principales de perturbation. Elle peut provenir de la réflexion de l'onde sur les côtes, ou de la rencontre de deux courants de l'onde-marée ayant contourné une île par les bords opposés. Ainsi une partie de la grande onde qui produit la marée dans l'Atlantique contourne les îles Britanniques par l'Ouest et redescend du Nord vers le Sud par le canal d'Irlande et par la mer du Nord. Elle rencontre dans le

canal d'Irlande et dans la Manche l'onde venant de l'Atlantique et y donne lieu à des interférences, surtout marquées dans le canal d'Irlande. Elle est perceptible dans la Manche, mais l'onde de l'Atlantique y domine nettement (amplitude 6,10 à Chorbouwg; 9,80 à Cayeux) car l'onde de la Mer du Nord est déjà atténuée avant le Pas de Calais (1,80 m. à Yarmouth). Son amplitude augmente dans le Détroit, mais s'amortit immédiatement après dans l'élargissement de la Manche (voir H. L. Partiot: Recherches sur les rivières à marée)

Le phénomène est analogue à celui du clapotis. Les deux ondes

$$\xi_1 = h_1 \sin \frac{\pi}{\ell} (Wt - x), \quad \xi_2 = h_2 \sin \frac{\pi}{\ell} (Wt + x), \quad h_1 = h_2 + \Delta h.$$

donnent par superposition

$$\xi = 2h_2 \sin \frac{\pi t}{T} \cos \frac{\pi x}{\ell} + \Delta h \sin \frac{\pi}{\ell} (Wt - x);$$

à un clapotis simple, d'amplitude $4h_2$ et de période $2T$, se superpose une houle d'amplitude $2\Delta h$, de célérité W et de même période. Donc l'amplitude résultante varie du maximum

$4h_2 + 2\Delta h = 2(h_1 + h_2)$ aux conjonctions (coïncidence des sommets des ondes) à

$0 + 2\Delta h = 2(h_1 - h_2)$ aux oppositions (coïncidence des sommets et des creux). On voit que les conjonctions sont distantes entre elles de ℓ et que les oppositions se trouvent à mi-chemin; elles sont d'ailleurs fixes dans l'espace et de période $2T$. W est la célérité moyenne des ondes, dont la célérité instantanée est variable.

En effet, posons

$$\xi = H \sin \left(\frac{\pi t}{T} - \varphi \right) = h_1 \sin \pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\ell} \right) + h_2 \sin \pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\ell} \right)$$

$$\text{Pour } t=0, \quad -H \sin \varphi = -h_1 \sin \frac{\pi x}{\ell} + h_2 \sin \frac{\pi x}{\ell}.$$

$$t = \frac{T}{2}, \quad H \cos \varphi = h_1 \cos \frac{\pi x}{\ell} + h_2 \cos \frac{\pi x}{\ell}.$$

$$\text{d'où } \operatorname{tg} \varphi = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \operatorname{tg} \frac{\pi x}{\ell}.$$

Pour une valeur donnée de x , le maximum de ξ correspond à

$$h_1 \cos \pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\ell} \right) + h_2 \cos \pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\ell} \right) = 0$$

$$H^2 = \xi_{\max}^2 = h_1^2 + h_2^2 + 2h_1 h_2 \sin \pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\ell} \right) \sin \pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\ell} \right) - 2h_1^2 \cos^2 \pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\ell} \right)$$

$$= h_1^2 + h_2^2 + 2h_1 h_2 \left[\sin \pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\ell} \right) \sin \pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\ell} \right) + \cos \pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\ell} \right) \cos \pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\ell} \right) \right]$$

$$H^2 = h_1^2 + h_2^2 + 2h_1 h_2 \cos \frac{2\pi x}{l}$$

Donc les maxima de H sont bien écartés de l ; les minima sont à mi-distance. Leurs positions sont fixes. Les lignes de conjonction correspondent à $x=0, l, \dots$; celles des oppositions à $x=\frac{l}{2}, \frac{3}{2}l, \dots$. Dans le premier cas, $\varphi=0$; dans le second $\varphi=\frac{\pi}{2}$. Les maxima de conjonction se produisent aux temps $\frac{T}{2}, \frac{5}{2}T$ etc. Les maxima d'opposition se produisent aux temps $0, T$ etc.

La célérité instantanée résulte de $\zeta=0, \varphi=\frac{\pi x}{l}$,

$$\text{tg} \frac{\pi x}{l} = \frac{h_1 + h_2}{h_1 - h_2} \text{tg} \frac{\pi x}{l}$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{W}{\frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \cos^2 \frac{\pi x}{l} + \frac{h_1 + h_2}{h_1 - h_2} \sin^2 \frac{\pi x}{l}}$$

La vitesse est minimum au temps $t = \frac{T}{2}$, c'est-à-dire aux conjonctions, et vaut $\frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} W$. Elle est maximum au temps $t=0$, c'est-à-dire aux oppositions et

$$\text{vaut} \frac{h_1 + h_2}{h_1 - h_2} W.$$

Les points de rencontre des ondes composantes, qui déterminent les lignes de flux et de reflux sont donnés par $\zeta_1 = \zeta_2$ ou

$$h_1 \sin \frac{\pi}{l} [Wt - x] = h_2 \sin \frac{\pi}{l} [Wt + x]$$

$$\text{D'où} \text{tg} \frac{\pi x}{l} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \text{tg} \frac{\pi}{l} Wt$$

Les lignes sont donc espacées d'une demi-longueur d'onde et leur célérité est W en moyenne, mais elle est variable entre un maximum et un minimum. En effet,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{W}{\frac{h_1 + h_2}{h_1 - h_2} \cos^2 \frac{\pi Wt}{l} + \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \sin^2 \frac{\pi Wt}{l}}$$

Lorsque $h_1 = h_2$, et $\Delta h = 0$, l'onde-marée prend la forme d'une potence simple et les interférences sont les plus caractérisées. Les lignes des conjonctions sont distantes de l ; les lignes des oppositions sont à mi-distance. Aux conjonctions, l'amplitude est $2h$. Lors des conjonctions, les célérités sont nulles partout.

Aux oppositions, l'amplitude est nulle. Lors des oppositions, l'eau est partout au niveau moyen, la célérité est infinie. Pratiquement les vitesses maxima se réalisent aux oppositions.

Les lignes de flux et de reflux sont définies par $\text{tg } \frac{\partial x}{\partial t} = 0$, c'est-à-dire qu'elles sont invariables et confondues avec les lignes des conjonctions.

Les lois, énoncées par M. Ribière, sont vérifiées dans le canal d'Irlande. La ligne de conjonction est en face de l'île de Man. L'amplitude y est maximum. Pendant le flot, deux courants de directions opposées se rencontrent sur cette ligne en se détruisant et en faisant monter la mer. A marée haute, il y a stalle générale de flot.

Quis deux courants de jusant partent de ce point dans des directions opposées; la mer baisse jusqu'à marée basse, où il y a stalle générale de jusant. Donc les stalles de flot et de jusant ne se produisent plus à mi-marée, mais à marée haute et basse.* Le canal est alors horizontal. La ligne des oppositions, à Loustown, 50 milles au sud de Dublin, se caractérise par un niveau constant, mais le maximum de vitesse des courants. * Le maximum de vitesse se produit à mi-marée, au lieu de marée haute ou basse.

6 Marées complexes réelles. En résumé, les marées qui ont au large, un caractère régulier d'ondes d'oscillation simples, avec stalles à mi-marée, subissent de grandes altérations au voisinage des côtes. Le caractère d'onde de translation se superpose au précédent, et du fait des interférences, les stalles se rapprochent de la haute et de la basse mer. C'est ce que l'on observe, par exemple, dans la Manche, bien qu'à un moindre degré que dans le canal d'Irlande. La ligne des conjonctions est Layern - Hastings, celle des oppositions, Chorbawg - Swanage. Mais d'autres influences s'y ajoutent: les frottements de fond et les frottements latéraux ainsi que les effets d'inertie.

Le frottement de fond retarde les couches inférieures et rompt l'égalité des vitesses du courant sur toute la hauteur. Les renversements de courant commencent donc par le fond et on peut avoir simultanément sur une même verticale des vitesses opposées en fond et à la surface. De même les frottements latéraux des côtes, par exemple dans les golfes, peuvent provoquer des renversements non concordants sur une même perpendiculaire à la direction de propagation, donnant lieu à des contre-courants.

Malgré les dissipations d'énergie auxquelles ces phénomènes donnent lieu, la réduction de profondeur et le rétrécissement de l'onde dans les baies et golfes donnent généralement lieu à un accroissement de célérité et d'amplitude. Les caractères sont très marqués. La célérité dans le Golfe de Gascogne est de 100 m., alors que la profondeur moyenne n'est que de 100 m. Dans la baie de Fundy (Nouvelle Écosse) la célérité est

de 81 m., alors que la profondeur est inférieure à 100 m. L'amplitude, de 2,00 à 2,60 à l'entrée de la baie atteint 12,40 à 14,60 au fond.

On conçoit que les courbes de marée se compliquent. Les courbes cotidales manquent des irrégularités au voisinage des côtes. Les courbes locales de marée deviennent complexes. Les branches deviennent inégales. Par exemple le jusant dure plus longtemps que le flot sur les côtes françaises de la Manche (différence maximum au Havre), alors que c'est l'inverse sur les côtes anglaises (Southampton) Au Havre, l'étale de pleine mer est très allongée : au moment du plein le niveau ne varie pas de plus de 0,10 m. pendant 1 h 30' en vive eau et 2 h. en morte eau. Cela est très avantageux pour l'accès du port. A Southampton, on trouve deux maxima, par suite d'ondes successives. Bref, les courbes présentent des irrégularités qui ne permettent plus de les représenter par des fonctions harmoniques simples. Mais on arrive généralement à les décomposer en sinusoïdes de périodes harmoniques, de périodes égales à $1/2$, $1/4$, $1/6$, $1/8$ et $1/10$ de jour. On doit opérer pour cela sur un grand nombre de courbes de marées relevées et en faire l'analyse harmonique. Lorsque ce travail est fait pour un certain nombre de points successifs d'une côte, on possède tous les éléments nécessaires, conjointement avec les données astronomiques, pour l'étude complète du phénomène, notamment les prévisions, des variations de la pression atmosphérique dans l'étendue du bassin et près des côtes influent sur le niveau. Leur influence est surtout sensible dans les petites mers fermées presque dépourvues de marée (Méditerranée) On possède des tables de correction d'après les pressions. L'action du vent soufflant sur une côte dans le sens de l'onde de marée ou en sens inverse, peut provoquer un relèvement ou un abaissement important de la marée, ce qui peut avoir des effets graves en vive eau. Dans la Méditerranée, ces fluctuations peuvent atteindre 1,50 m.

1) Courants provoqués par la marée dans un canal.

Supposons un canal horizontal de grande longueur et de section horizontale large débouchant dans la mer; c'est le cas d'un canal maritime à marée tel que le canal de Suez. Si H est la profondeur aux points assez éloignés de l'embouchure pour que la variation ne se fasse plus sentir,

h la hauteur du niveau moyen de la mer au dessus du

du fond du canal;

ξ la surélévation au-dessus du niveau H d'un point quelconque au temps t ;

αh la demi-amplitude de la marée, α étant petit. A l'embouchure,

$$H + \xi = h \left(1 + \alpha \sin \frac{\pi t}{T} \right)$$

Nous avons vu que le déplacement d'une onde de translation très allongée et peu élevée se fait suivant la loi

$$x = \sqrt{gH} \left(1 + \frac{3\xi}{2H} \right) t + f(\xi)$$

$$\text{Donc } 0 = \sqrt{gH} \left(1 + \frac{3\xi}{2H} \right) \frac{T}{\pi} \arcsin \frac{H - h + \xi}{\alpha h} + f(\xi)$$

$$\text{D'où } x = \sqrt{gH} \left(1 + \frac{3\xi}{2H} \right) \left[t - \frac{T}{\pi} \arcsin \frac{H - h + \xi}{\alpha h} \right]$$

C'est l'équation de la surface libre que l'on peut tracer par points à divers époques. La vitesse du courant est, selon la formule des ondes de translation allongées

$$V = \sqrt{gH} \left(1 - \frac{\xi}{4H} \right) \frac{\xi}{H + \xi}$$

Cette formule ne présente qu'un intérêt théorique, vu qu'elle néglige l'influence des frottements, qui limite la zone d'action du flux et du reflux et réduit l'énergie de l'onde, de même qu'elle empêche la constance de H . Mais il se présente des cas, tels que pour le canal de Suez, où des lacs de grande étendue, limitent théoriquement l'action de la marée (Lacs Omers). Un mouvement ondulatoire s'établit entre la mer et les bassins dans l'étendue du canal. Le mouvement est très complexe par suite des frottements et des variations de la profondeur, qui modifient la forme de l'onde et la célérité. Celle-ci augmente lorsque la profondeur diminue, par suite de l'inertie. Les états de courant qui, théoriquement, devraient se produire à mi-marée, se rapprochent des hautes et basses mers.

L'interprétation des faits suivant des bases théoriques ne peut se faire que d'après de longues observations.

Supposons le niveau H des lacs constant. Au bout d'un certain temps, un état de régime s'établit et le volume total d'eau pénétrant dans le canal pendant une période est nul. Donc

$$\int_0^{2T} (H + \xi) V dt = 0 \text{ ou } \int_0^{2T} \left(\xi + \frac{3\xi^2}{4H^2} \right) dt = 0$$

$$\int_0^{2T} \left\{ h \left(1 + \alpha \sin \frac{\pi t}{T} \right) - H + \frac{3}{4H^2} \left[h \left(1 + \alpha \sin \frac{\pi t}{T} \right) - H \right]^2 \right\} dt = 0$$

$$D'où H = h \left(1 + \frac{3}{8} \alpha^2 \right)$$

Le niveau moyen des lacs serait donc légèrement supérieur à celui de la mer. On conçoit que les pertes d'énergie par frottement peuvent atténuer sinon masquer ce phénomène, dont l'observation n'a pas fourni la preuve.

du niveau

8 Bassins à marée. Le problème des fluctuations de l'eau dans un bassin communiquant avec une mer à marée est un problème très complexe également, mais surtout du point de vue mathématique, les conditions physiques étant relativement simples. Le problème présente de l'intérêt au point de vue des ports, du régime des étangs côtiers et de la récupération de l'énergie des marées.

Si S est la surface au niveau Z d'un bassin communiquant par un orifice moyé constant Ω avec la mer, si ξ est le niveau correspondant de la mer, on a

$$q = M \Omega \sqrt{2g(\xi - Z)} \quad \text{au remplissage}$$

Mais $q \cdot dt = S \cdot dz$. D'où

$$S \frac{dz}{dt} = M \Omega \sqrt{2g(\xi - Z)}$$

La loi de variation de ξ est fonction du temps et connue. Même pour la loi sinusoïdale simple, l'équation n'est pas intégrable. Des solutions approximatives, bien que très complexes, ont montré que l'amplitude de l'oscillation dans le bassin est inférieure à celle de la marée extérieure, d'autant plus que l'orifice est relativement plus petit. Le régime qui s'établit dépend des conditions initiales. Le moyen le plus pratique est de procéder par l'équation aux différences finies, d'après les courbes de marée et d'après le régime de manœuvre des vannes s'il s'agit d'une station marémotrice. L'étude devient alors analogue à celle des réservoirs.

Lorsqu'un bassin ou un étang communique librement avec la mer à marée par un goulet, il s'y établit un régime périodique. Supposons que la marée soit

$$\xi = h \sin \alpha t; \text{ dans l'étang, elle sera}$$

représentée par

$$z = A \sin(\alpha t - \varphi) \text{ en admettant les mêmes}$$

niveaux moyens. On a donc

$$\frac{dz}{dt} = \alpha A \cos(\alpha t - \varphi)$$

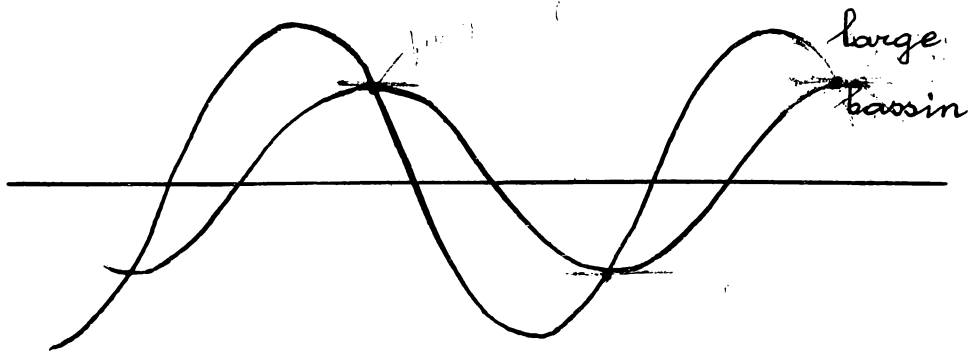
Donc $S^2 \alpha^2 A^2 \cos^2(\alpha t - \varphi) = M^2 \Omega^2 2g \left[h \sin \alpha t - A \sin(\alpha t - \varphi) \right]$
 quelle que soit la valeur de t .

Faisons
$$\frac{2g M^2 \Omega^2}{S^2 \alpha^2} = K$$

Pour $t=0$, $A \cos^2 \varphi = K \sin \varphi$ ou $A \sin^2 \varphi + K \sin \varphi - A = 0$

Pour $\alpha t - \varphi = 0$, $A^2 = K h \sin \varphi$.

La première équation montre que $0 < \sin \varphi < 1$; donc le mouvement dans le bassin est en retard sur celui de la mer; les maxima et minima ont lieu entre la haute mer et mi-marée descendante, et entre la basse mer et mi-marée montante. A ces moments $\frac{dz}{dt} = 0$, donc $\eta = 0$ et $\xi = z$.



Donc les niveaux de la mer et du bassin correspondent au maximum de plein et au niveau minimum dans le bassin; les courants dans le goulet se renversent à ces époques, en retard sur la haute et la basse mer.

Il en résulte

$$\alpha t - \varphi = \frac{\pi}{2} \text{ et } \xi = h \cos \varphi \cdot A$$

φ sera d'autant plus petit que K sera plus grand, c'est-à-dire $\frac{M \Omega}{S}$.

En outre, $A < h$, c. à d. que l'amplitude de la marée dans le bassin est moindre qu'au large, d'autant plus que K est plus petit.

Ces quelques exemples simples montrent l'importance des phénomènes provenant de la marée et éclairent les phénomènes observés dans les rivières à marée.

Cours de Génie Maritime

Chapitre I. La Mer et les Côtes.

1 La mer. L'eau marine contient en moyenne 3,5% de substances salines dans les océans. Dans les mers fermées, la salure dépend de l'évaporation. Dans la Baltique, elle varie de 1,3 à 0,5% du Grand Belt au Golfe de Botnie; dans la Méditerranée, elle est en moyenne de 3,80%; dans la Mer Rouge, jusqu'à 4% et 21,7% dans la Mer Noire.

La composition moyenne de la salure est

Na Cl	Mg Cl ²	SO ⁴ Mg	SO ⁴ Ca	SO ⁴ K ²	Mg Br ²	CO ³ Ca
77,8	10,9	4,7	3,6	2,5	0,22	0,34%

L'eau marine dissout le calcaire des eaux fluviales. Le poids spécifique dépend de la salure s (en %) et de la température. A $15,6^{\circ}\text{C}$, $w = 1 + 0,00741s$. Le poids spécifique moyen est donc 1,026, dans la Baltique 1,007.

La température superficielle de la mer varie peu dans un jour et même en une année. L'action du soleil ne dépasse guère 100 à 160 m de profondeur et la température des couches inférieures dépend surtout des courants. La température décroît d'abord rapidement à partir de la surface, puis plus lentement. La température moyenne de l'Océan est d'environ 4°C et $1,8^{\circ}\text{C}$ à 4000 m de profondeur. L'eau marine à salure normale se congèle à $-2,2^{\circ}\text{C}$; dans la Baltique à -1°C .

Des courants généraux prennent naissance dans les Océans, provenant des différences de densité provoquées par l'action solaire, et des effets de la rotation terrestre. Ainsi le Gulf-Stream se produit dans les régions équatoriales de l'Atlantique par ascension des eaux profondes, plus légères que les eaux de surface dont l'évaporation intense augmente la salure. Le courant est dévié vers l'Ouest par la rotation de la Terre. Il bifurque sur les côtes américaines; sa branche nord se dirige vers le pôle et est déviée vers le nord-est par la rotation terrestre. Au Labrador, la vitesse du courant atteint cinq nœuds, sa largeur est de 60 km. et sa température est de 15° supérieure à celle des eaux ambiantes. Le Gulf-Stream s'incurve et redescend le long des côtes du Spitzberg et de

la Norvège vers l'Europe du Nord - Ouest, dont il adoucit le climat. Au milieu de ce circuit se trouve une mer immobile, où les varechs s'accumulent; elle est appelée pour cette raison Mer des Sargasses.

Des courants analogues existent dans l'Atlantique Sud, dans le Pacifique etc. On les voit figurés sur les cartes marines.

2 Régime des vents. L'observation et la connaissance du régime des vents sont particulièrement nécessaires, surtout près des côtes et des ports, non seulement à cause des effets directs des vents de tempête sur les navires et les ouvrages, mais surtout à cause de leurs effets sur les eaux.

Ce sont en effet les vents qui donnent naissance aux vagues et aux courants locaux qui, avec les marées déterminent le régime des côtes. Ce sont les vents violents qui donnent naissance aux coups de mer. Les vents se caractérisent par la direction et l'intensité. La direction se note par le point cardinal d'où souffle le vent. Elle s'exprime en divisions de la rose des vents (32^{es} de circonférence = $11^{\circ}15'$ = un quart) rapportée aux points cardinaux vrais, c. à d. corrigée de la déclinaison magnétique. L'intensité du vent s'exprime par sa vitesse en m/sec. On adopte parfois l'échelle empirique de Beaufort en degrés de 0 à 12. La pression du vent se calcule par la formule $p = Kv^2 \text{ Kg/m}^2$ (Kg, m, sec)

D'après Eiffel, $K = 0,08$ pour des surfaces normales au vent;
 0,09 " " treillis;
 0,06 " " cables ou fils;
 0,025 " " cylindres (tours de phares)

La vitesse ne dépasse guère 40 à 50 m./sec., soit des pressions de 125 à 200 Kg./m².

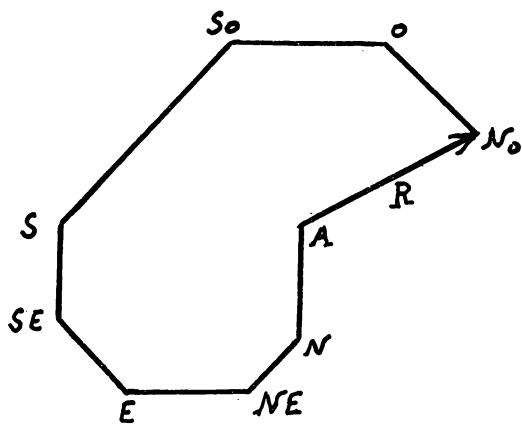
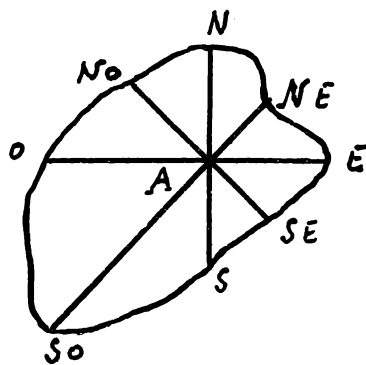
On adopte souvent pour les surfaces normales au vent la valeur de 275 Kg./m². Cependant lors du renversement du pont sur la Bay en Écosse, on avait mesuré à l'Observatoire de Bidston 400 Kg./m².

Echelle de Beaufort

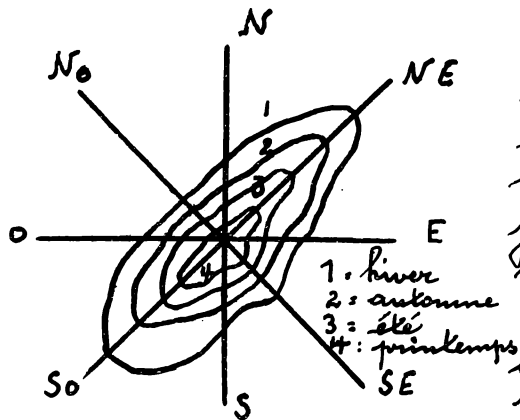
0 Air calme $v = 0$ à $1,3 \text{ m/sec.}$, $p = 0$ à $0,2 \text{ Kg/m}^2$	7 Vent fort $v = 17,9 \text{ m/sec.}$, $p = 38,7 \text{ Kg/m}^2$
1 L'air léger souffle ou très léger souffle 3,6	8 Vent violent 21,5 55,6
2 Brise faible 5,8	9 Tempête 25 75,6
3 Brise légère 8	10 Forte temp. 29,1 102,5
4 Brise moyenne 10,3	11 Temp. violente 33,5 135,7
5 Brise fraîche 12,5	12 Ouragan 40,2 195,5
6 Forte brise 15,2	et au-delà.

La direction du vent s'observe par les giranettes ; l'intensité, au moyen des anémomètres.

Le régime observé des vents se représente en portant sur un diagramme polaire, orienté suivant la rose des vents, le nombre de jours pendant lesquels le vent souffle suivant chaque direction, d'après une année d'observations.



On joint les points extérieurs par une courbe, dont l'altère fait connaître les vents régnants ou dominants. Pour connaître leur répartition suivant les saisons, on



porte successivement sur chaque vecteur, à partir du centre, les nombres de jours de vent correspondant au printemps, à l'été, à l'automne et à l'hiver. On joint les points de division, d'une manière continue, par des courbes.

Au lieu des nombres de jours, on peut porter suivant les vecteurs, les produits des nombres de jours par les

vitesse moyennes résultant des observations (produits nV) ou par les produits nV^2 , représentatifs des pressions.

On déduit parfois de ces diagrammes ce qu'on appelle les résultantes, de la manière suivante. On porte bout à bout des vecteurs dirigés suivant les huit directions principales de la rose des vents et proportionnels au nombre de jours d'action de ces vents.

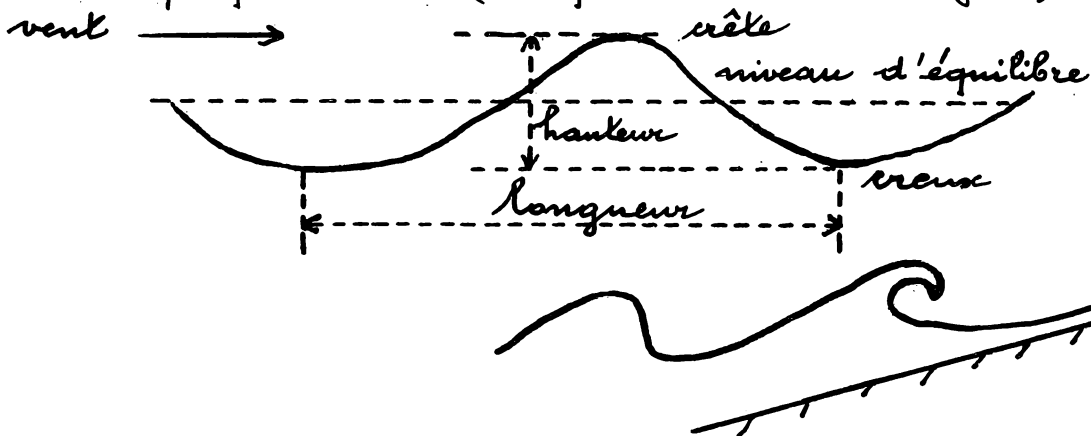
On obtient un polygone ouvert dont le côté de fermeture est la résultante.

On opère de même pour les produits des nombres de jours n par les vitesses moyennes v et pour les produits nV^2 . Ces figures n'ont d'autre signification qu'un mode de représentation conventionnel mais suggestif.

3 Les vagues. L'effet le plus apparent de l'action des vents sur la surface de la mer est la formation de vagues, c.à.d. d'ondulations périodiques se déplaçant dans le même sens que le vent. La partie qui reçoit le vent a une inclinaison plus faible que la partie sous le vent, ce qui correspond à une marche plus rapide de la tête que du pied de la vague.

à cause des résistances des couches sous-jacentes. Ainsi que nous l'avons vu dans l'étude de la houle, les ondulations s'éteignent rapidement en profondeur. Les obstacles à la propagation des vagues créent une certaine zone de calme sous le vent. On tire parti de ce fait pour les manœuvres des canots des navires, pour le balisage, etc.

Quand la profondeur d'eau diminue, les vagues augmentent de hauteur (voir théorie des modes d'oscillation), deviennent instables et déferlent, c. à d. se brisent en écumant, généralement vers l'avant. Cela se produit non seulement sur les plages en pente douce des rivages, mais sur les hauts-fonds du large, dont les zones écumeuses sont appelées brisants. Par destruction partielle de l'énergie des vagues, ils protègent les côtes en arrière. Les zones de mer peu profondes, telles que le Golfe de Gascogne, sont généralement dures; la mer y maintient fréquemment (déferlement des vagues)



Il a été constaté que les vagues peuvent briser, même par assez grande profondeur au droit d'un relèvement brusque du fond. Les profondeurs de déferlement sont mal établies; elles dépendent du vent et des courants. Les vents contraires retardent le déferlement ($\frac{H}{P} = 0,72$); les vents du large le favorisent $\frac{H}{P} = 1,25$. Dans les mêmes conditions, plage en pente de 1%, par temps calme $\frac{H}{P} = 1$. Une pente plus forte du fond favorise le déferlement $\frac{H}{P} = 2$. Les vents contraires, notamment le reflux des vagues, favorisent le déferlement (ressac) $\frac{H}{P}$ varie de 0,72 à 2,35 selon les observations et d'après les circonstances exposées. Les courants inversés à la direction de propagation des vagues peuvent aussi les arrêter en les faisant déferler; c'est ce qui se produit à l'embouchure d'un très grand fleuve tel que le Nil, lors d'une cue. de filage à l'huile, c. à d. le répandage d'une couche très mince d'huile (1/100.000 de m/m) a pour effet d'empêcher le déferlement. Les brisants sont rom-

placés par de longues ondulations calmes. Le procédé est utile, non seulement pour les navires, mais pour les travaux. On immerge à la surface de l'eau un sac blanc rempli d'étoffe saturée d'huile de poisson.

L'influence de la vitesse du vent sur la célérité des vagues est mal définie. D'après M. Antoine $W = 6,9 \sqrt{v}$ (m/sec)

Les vagues ont une vitesse souvent plus grande que celle du vent; le rapport $\frac{v}{W}$ varie en moyenne de 0,5 à 1,2. Par contre, la vitesse propre des particules superficielles des vagues est bien inférieure à celle du vent. Lorsque le vent a fini de souffler, l'agitation de la surface de l'eau se maintient par inertie, mais se régularise; c'est la houle. Mais la propagation des vagues à une vitesse supérieure à celle du vent peut aussi, par suite de l'amortissement très faible, provoquer la houle dans la direction où souffle le vent, quelques heures avant que le vent n'arrive au lieu considéré; c'est ce qui explique que la houle précède souvent et annonce la tempête.

Nous avons donné, à propos de la théorie de la houle, des indications sur les caractéristiques moyennes et extrêmes des houles. Dans les océans, on trouve des vagues de 12, 14 et même 19 m. d'amplitude, au large et près des côtes. Dans la Manche et la Méditerranée, ainsi que dans la Mer du Nord le maximum est de 4 à 5,50 m.; dans le Golfe de Gascogne, 6 à 7 m.; dans la Baltique, 3 m.

Nous avons vu que dans les baies, les ondulations ont une tendance à s'accroître vers le fond. On a voulu faire dépendre ce phénomène de l'étendue du champ d'action du vent.

M. Ch. Stevenson a donné les formules

$$2h = 0,45 \sqrt{f} \quad \text{si } f < 39 ;$$

$$2h = 0,45 \sqrt{f} + (0,75 - 0,3 \sqrt{f}) \quad \text{si } f > 39,$$

f étant la longueur du domaine d'action du vent en miles marins (1852 m), $2h$ étant en m. la hauteur totale des vagues.

Comme formule donnant la hauteur des lames en fonction de la vitesse du vent, en pleine mer, on peut employer

$$2h = \frac{v}{4} \quad \text{ou} \quad 2h = \frac{3}{4} \sqrt[3]{v^2} \quad (\text{rapport des Bois}) \quad \text{si } v < 20 \text{ ou } 30 \text{ m/sec.}$$

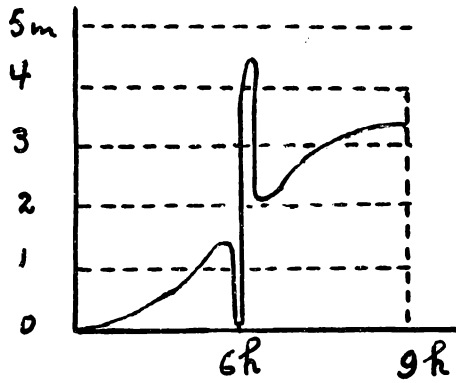
En dessous, on emploiera $2h = \frac{v}{3}$.

Nous avons vu, à propos de l'étude des ondes de marée, de quelle manière une diminution progressive de profondeur agit sur la hauteur des ondes. On peut s'orienter d'après ces données pour les vagues. Quant à la

célérité, elle décroît en même temps, s'il n'y a pas de rétrécissement. Sur une plage en pente inférieure à $1/100$, si $H \leq \frac{2L}{3}$, on a

$$v_1 = 0,9 V \sqrt{\frac{H_1}{H}} \quad \text{d'après M. Baillard.}$$

Les raz de marée sont des vagues énormes et brusques qui produisent généralement des effets violents et désastreux. Ils peuvent résulter de cyclones, mais aussi de séismes et agir alors à de très grandes distances de l'épicentre.

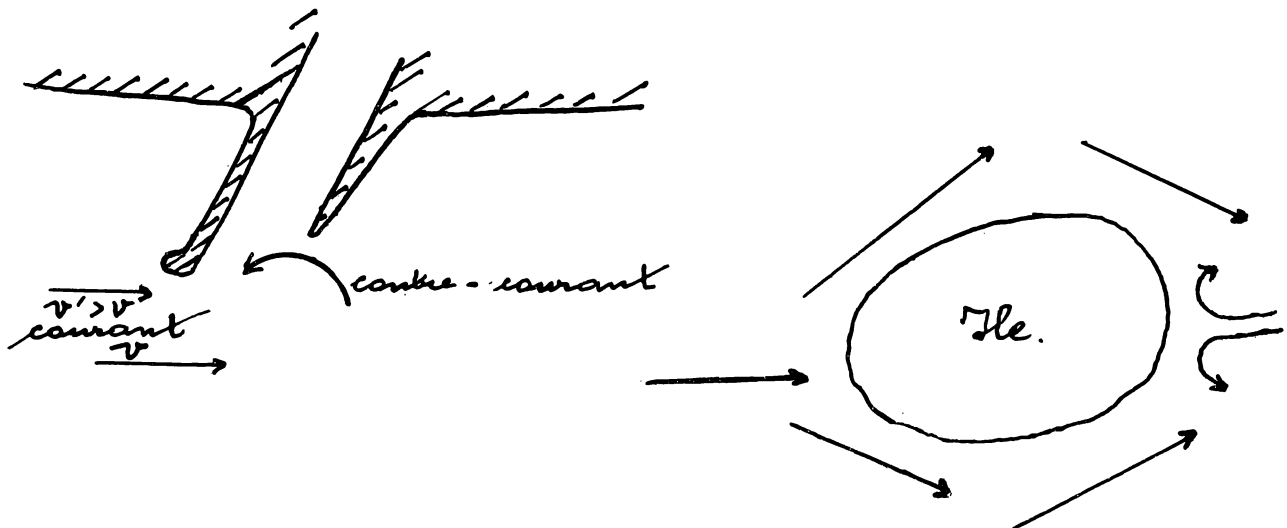


Courbe d'un raz de marée à Flamanville en 1725 (d'après M. Bénézit)

4 Courants locaux

Les courants locaux résultent, ainsi que nous l'avons vu, des sudes-marées, mais aussi de l'action prolongée du vent. On les trouve dans l'Océan Indien, causés par les moussons dans le Pacifique, dans la Baltique, où la vitesse des courants littoraux atteint jus-

qu'à deux noeuds. La vitesse est souvent plus grande près des côtes, où se produisent les courants littoraux, charriant des sables. Les irrégularités du rivage, naturelles ou artificielles (môle, promontoire, etc.) produisent des tourbillons et des contre-courants, entraînant généralement une accélération dans les passages rétrécis. Il en est de même si le courant est divisé par une île; il se produit des remous en avant et,



entre l'île et la côte, surtout si le fond se relève, il se forme des courants très rapides et très dangereux appelés raz en termes de marine français (raz Blanchard entre l'île d'Origny et le Cotentin, fonds passant de 40 à 10 m., vitesse de 10 à 12 noeuds). Il peut se produire des anomalies telles que des courants inverses superposés, comme nous l'avons vu à propos des marées. Dans le Déroit de Gibraltar, un courant supérieur entre dans la Méditerranée, un courant inférieur en sort. Contrairement à la règle, le courant est plus rapide dans le fond qu'à la surface dans la Baie de la Somme.

Le phénomène peut correspondre à ce qu'on appelle le flot ou courant de fond. Lorsque sous l'action prolongée des rafales, une masse marine est mise en mouvement d'oscillation générale, les particules décrivent des orbites qui peuvent être circulaires en surface, mais deviennent des ellipses de plus en plus plates en profondeur. Sur le fond ces trajectoires deviennent des droites. Donc les particules se déplacent horizontalement sur le fond, d'une manière périodique, mais en même temps ce mouvement se propage avec une célérité générale lorsque toute la masse liquide est en mouvement. Si le fond reste horizontal et surtout s'il descend, la force vive s'amortit. Donc les forces arrêtent ou atténuent le flot de fond. Si le fond se relève constamment, l'énergie s'accumule dans une masse toujours moindre et le flot peut devenir rapide, d'autant plus que l'agitation vient de plus loin, c. à d. que la mer est plus longue. Au voisinage des côtes, le relèvement du fond peut provoquer l'exhaussement de l'onde qui vient déferler sous forme de "lame de fond", souvent violente et inattendue, la surface étant calme. Mais si un haut fond précède la rade, à condition qu'elle soit assez étendue et les frottements aidants, l'énergie du flot de fond s'y dissipera comme dans une fosse, assez pour le rendre inoffensif. Donc il est avantageux d'avoir un haut fond en avant d'une rade ouverte aux fortes tempêtes. Ceci concorde avec une remarque analogue au sujet de la propagation des lames de surface.

Pour les fonds horizontaux, les vitesses des flots de fond peuvent se calculer sensiblement par les formules des courants de marée; il n'en est pas de même si le fond est en pente. La question est très spéciale et peu étudiée

(voir A.P.C. 1881, 1^{er} semestre, page 587)

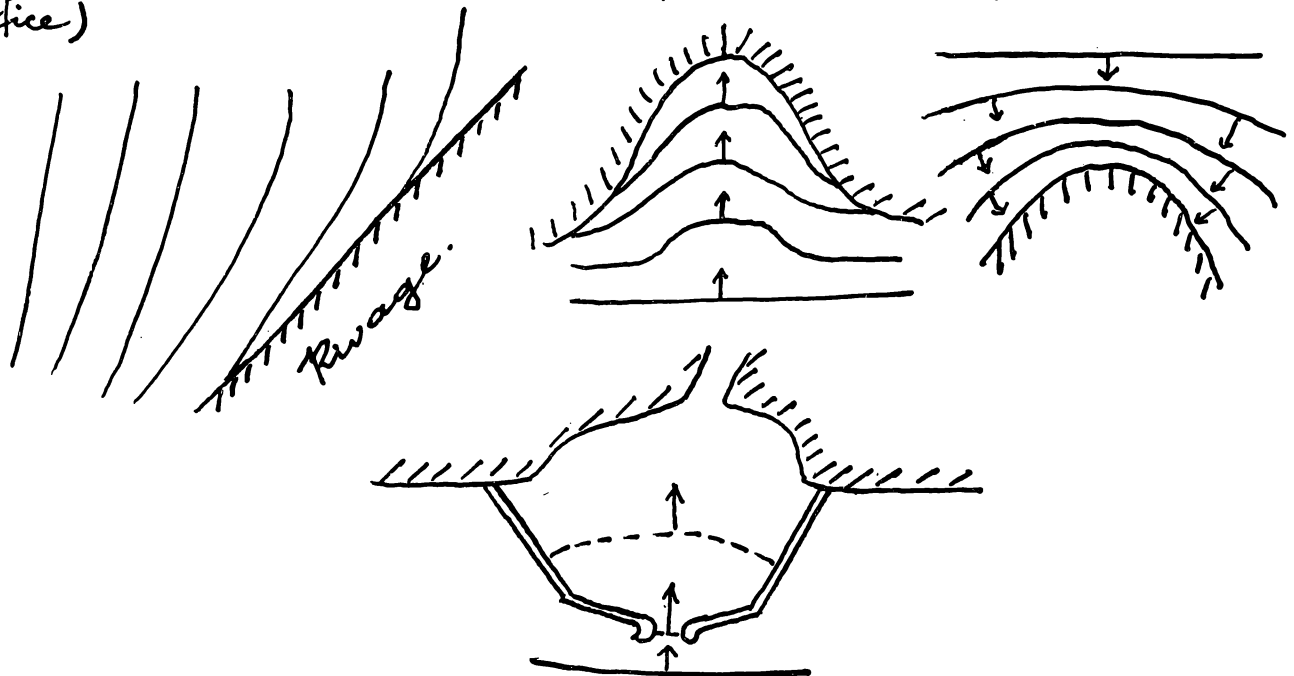
5 Action des côtes.

Nous avons exposé dans l'étude des marées les perturbations que les côtes apportent à ces mouvements d'oscillation générale de la mer et à leurs effets. Nous avons esquissé ci-dessus les effets des côtes sur les courants, notamment la formation de courants littoraux dirigés par les côtes.

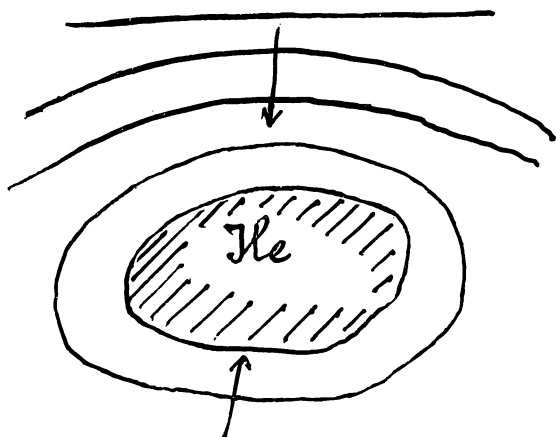
Les rivages exercent des actions analogues sur les vagues et hordes. Sur les fonds en pente douce, les vagues déforment. Sur les parois abruptes ou très inclinées (falaises, perrés, murs), elles se réfléchissent en majeure partie et il se forme un clapotis, généralement beaucoup plus complexe que le phénomène que nous avons étudié théoriquement. Il est néanmoins caractérisé par une amplitude, une énergie accrue et une certaine instabilité des crêtes aux faibles profondeurs relatives, caractérisée par des projections souvent élevées. Lorsque le phénomène devient ainsi très turbulent, il prend le nom de ressac; il peut produire des affouillements très intenses en avant du pied de l'obstacle.

Le gaufrage s'observe rarement sauf si la côte oblique par rapport à la propagation des vagues est très abrupte.

Toutefois les talus à 45° et même à 33° , d'après des expériences, réfléchissent les vagues, à condition d'être assez élevées pour ne pas être submergées. Les vagues peuvent ainsi se propager par réflexion à l'intérieur des ports, d'une manière très gênante comme à Cherbourg, où l'on a dû construire dans l'avant du port un épi interceptant les vagues réfléchies. (à la place d'un écueil naturel qui réalisait auparavant cet office)



Les plages en pente douce abordées obliquement par les vagues retardent celles-ci au fur et à mesure qu'elles abordent des fonds plus élevés et produisent ainsi une espèce de conversion des vagues qui viennent se rabattre sur le rivage. On observe une conversion analo-



gue autour des murs des jetées et autour des îles; les vagues peuvent ainsi acquérir une direction presque opposée à celle du vent (Belle-Île en Mer)

Dans les baies en forme d'entonnai assez resserré, les lames se raccourcissent dans leur marche, mais en s'élevant de plus en plus et en devenant parfois tumultueuses. Si la baie est largement évasée, les lames s'incurvent en plan, étant retardées sur les bords. Cette courbure s'accroît vers le fond de la baie. Si les lames pénètrent par un goulet dans un espace s'évasant rapidement (étang naturel ou port à jetées convergentes), leur longueur augmente, mais leur amplitude s'amortit rapidement. Dans le cas du canal étroit, il semble que la hauteur des vagues croisse en raison inverse de la racine carrée de la largeur et de la profondeur.

Dans le cas d'un bassin à goulet, selon M. Gaillard

$$h' = h \left[\sqrt{\frac{b}{B}} - 0,027 \sqrt{D} \left(1 + \sqrt{\frac{b}{B}} \right) \right] \text{ en m. ,}$$

h étant la hauteur des vagues à l'entrée du port de largeur b ,
 h' " " " " " " " " distance D de l'entrée du port
 où la largeur est B . Cette formule est assez peu sûre.

Lorsque les vagues se déplacent parallèlement à une côte, elles se relèvent généralement au voisinage immédiat de celle-ci, à cause des frottements et de la réduction de profondeur.

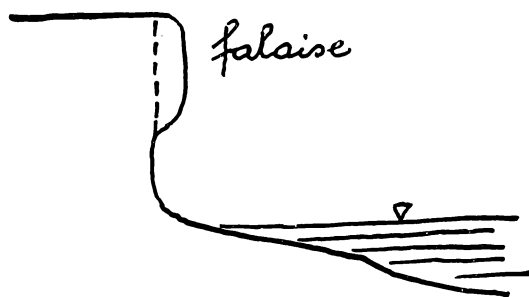
Il est utile, pour les ouvrages de connaître le niveau maximum auquel peuvent s'élever les vagues au-dessus de l'eau calme. Pour la houle en profondeur indéfinie et des vagues d'amplitude $2h$, c'est

$$a = h + \frac{\pi}{2} \frac{h^2}{\lambda} = h + 1,5708 \frac{h^2}{\lambda} \quad (2\lambda = \text{longueur d'onde})$$

Mais au voisinage des côtes, en eau peu profonde, d'après les observations de M. Gaillard, $a \equiv 0,637$ à $0,89h$, avec une moyenne de $0,75h$ environ.

6 Action des mers sur les côtes. Les mers remanient incessamment les côtes par l'érosion et les dépôts. Les matières solides déplacées au voisinage des côtes proviennent surtout de cette action, car les fleuves ne peuvent plus déverser dans les mers que des sables et des vases en gluvéal.

Les falaises sont incessamment rongées au pied par l'action des vagues. Les roches très dures : gneiss, granites, basaltes résistent assez bien. Les roches feldspathiques et calcaires s'altèrent par les actions atmosphériques particulièrement intenses sur les côtes : pluies, vents, embruns, vagues, etc. Cette action constante et éventuellement la dissolution contribuent à l'usure des côtes, qui se produit par éboulements locaux constants. Les blocs sont alors remaniés, broyés, partiellement dissous et les parties dures forment les

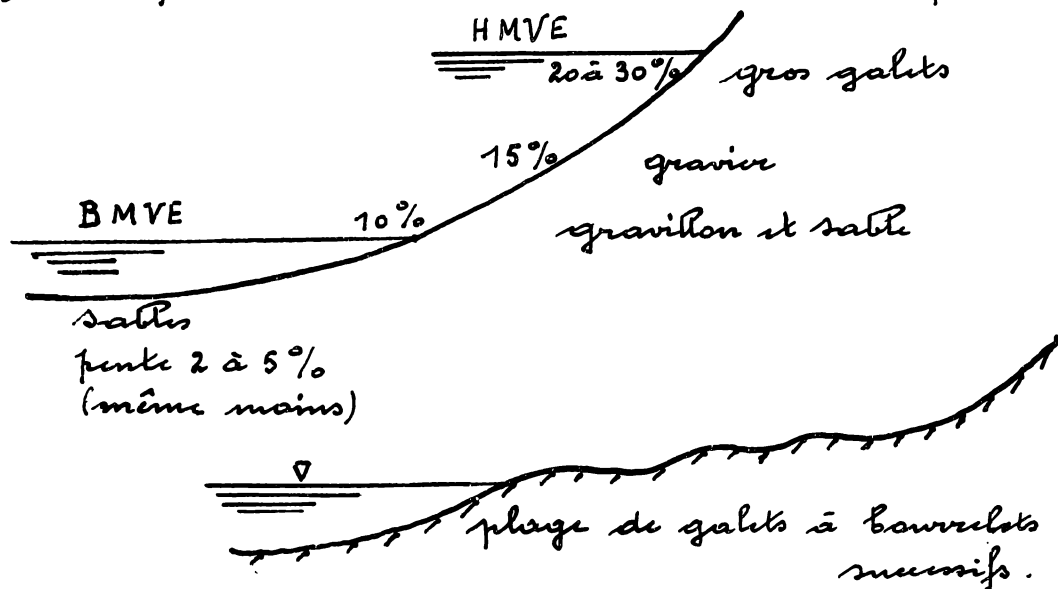


galets roulés, tels que ceux formant les plages françaises de la Manche. Le broyage des galets et l'effritement des roches siliceuses donne les sables, tels que ceux des plages de la mer du Nord. Les sables peuvent contenir de nombreux apports fluviaux, surtout s'ils sont très fins. Le dernier sta-

de de broyage est celui des vases impalpables, constamment en suspension dans les endroits agités par les courants et les vagues, et qui ne se dépose que dans les endroits absolument calmes.

Les courants marins charrient des vases et des sables ; il en est de même du flot de fond. Le long des côtes inclinées par rapport aux vents dominants, il se forment des courants littoraux qui entraînent souvent de grandes quantités de matières solides. Celles-ci se déposent dans les endroits calmes : anfractuosités, baies, etc. et forment ce qu'on appelle des cordons littoraux, qui se rattachent aux barres des estuaires et peuvent complètement isoler de la mer des étangs ou des lagunes (Exemples : étangs d'Arcachon, de Berre, "halls" de la Baltique, etc... Voir cours d'Hydraulique fluviale)

Les vagues déplacent non seulement des sables, mais aussi les galets, parfois de dimensions très considérables lors des tempêtes. Lorsque l'on considère une côte normale à la direction de propagation des vagues et formée de débris accumulés par elles, on y reconnaît un profil d'équilibre dépendant de la nature des matériaux et de l'amplitude de la marée. Entre les hautes et de basse mer s'étend une plage ou grève qui porte le nom d'estran. Cette partie présente généralement la pente la plus faible, tout au moins dans sa zone inférieure : 5 à 2%, même moins, selon la finesse du sable.

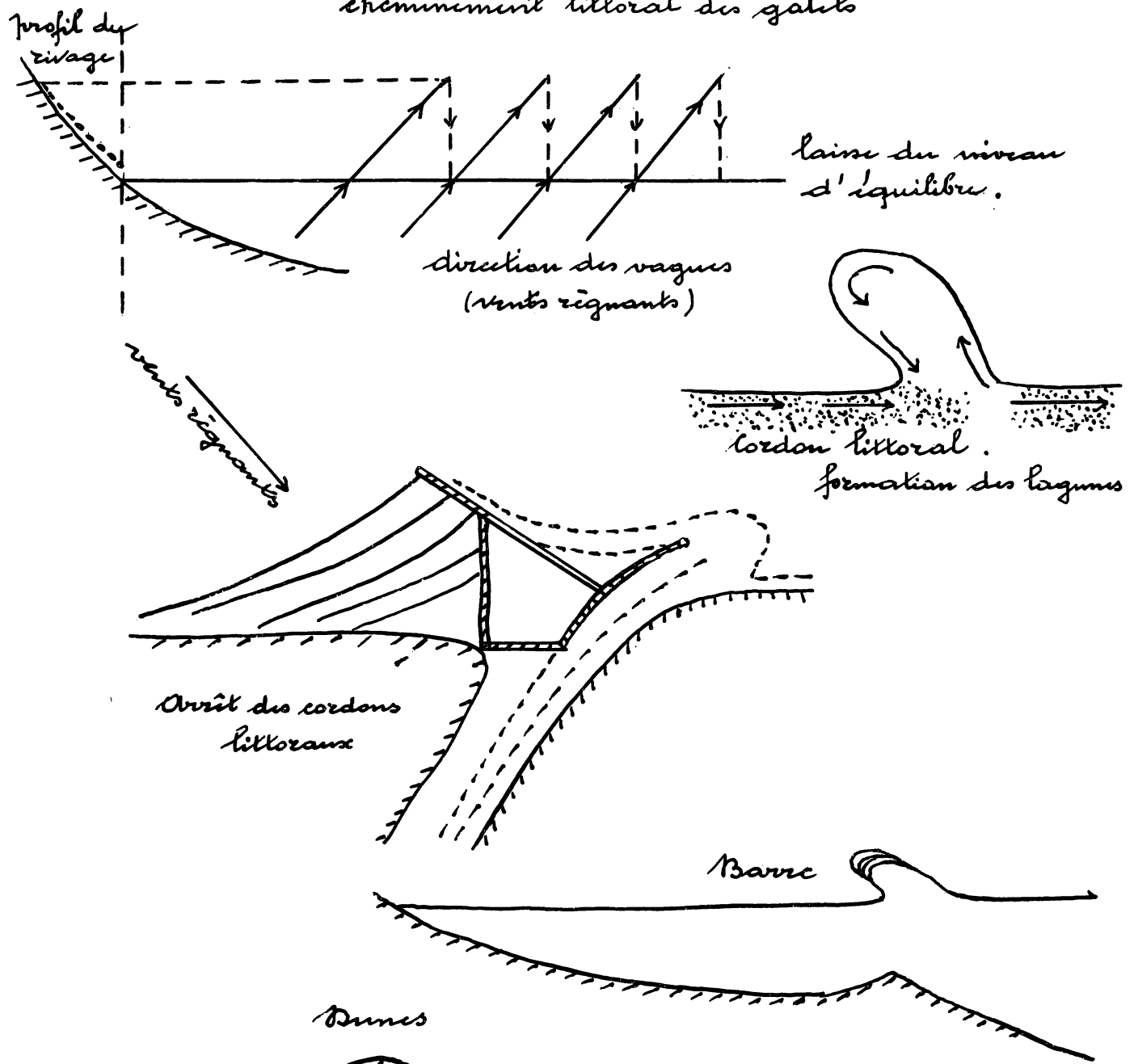


La pente augmente vers la laisse de haute mer, où l'action des vagues est la plus forte et où l'on trouve les plus gros matériaux, les esquilles, etc. De 10% pour le gravier et le sable, on passe à 15% pour le gravier et jusqu'à 20 à 30% pour les gros galets ; au-delà, on peut trouver les falaises abruptes d'argile, de schiste, de calcaire, de grès ou de roc dur. À la limite supérieure de l'estran, sur les plages de galets, on peut trouver des bœuvrellets successifs correspondant aux hautes et basses mers de diverses amplitudes.

Si les vagues se propagent obliquement par rapport à la côte, les galets projetés suivant une oblique sur l'estran incliné, dépassent, du fait de l'impulsion et de la poursuite, la position d'équilibre et, lors du retrait de la vague, ils redescendent suivant une ligne de plus grande pente. Le ressac peut d'ailleurs favoriser la descente. Le galet est ensuite repoussé sur la pente par les vagues suivantes et le processus recommence. Il en résulte dans l'ensemble un déplacement des galets le long de la côte, dans le sens des vents régnants. Les galets ne peuvent guère former des cordons aussi prononcés que les sables ; ils s'accumulent contre

les obstacles à leur marche : promontoires, jetés, etc. ou dans les dépressions : anses etc.

cheminement littoral des galets



Les galets, comme les sables lorsqu'ils sont arrêtés par un obstacle saillant, s'accu-
 mulent du côté de la propagation suivant des limites concaves vers la mer, se raccordant tangentiellement à la rive vers l'a-
 mont. Le dépôt engraisse progressivement, la concavité se prononce et l'élément terminal de courbe devient finalement normal à la propagation des vagues. Un équilibre peut alors être réalisé si l'obstacle (épi) est parallèle à la direction des va-
 ques, de manière que le dépôt peut engraisser sans déborder

sur l'obstacle, Simon, l'extrémité de l'obstacle étant atteinte, à une certaine époque, l'action des vagues y redeviendra suffisante pour déplacer les galets au-delà. Quant aux sables, ils seront toujours entraînés dès que l'extrémité de l'obstacle sera atteinte. Il faut noter d'ailleurs qu'au cours de leur déplacement, les galets sont soumis à un broyage énergique qui les réduit petit à petit à l'état de sable.

Des atterrissements tendent à se former derrière les obstacles, à la propagation des vagues et courants: îles ou même simples hauts fonds suffisants pour faire dévier. Ainsi des îles tendent petit à petit à se réunir à la rive et à former des presque îles, au moins à marée basse. A moins qu'un courant littoral assez vif ne maintienne les profondeurs entre l'île et la rive. Il s'en forme aussi à la rencontre de deux courants: par exemple dans l'estuaire de la Seine (voir cours d'hydraulique fluviale, chapitre des estuaires, devant les estuaires des mers sans marées (Bavres). Les Bavres peuvent aussi se former dans les mers parallèlement aux côtes du fait de la rencontre des lames directes et des lames réfléchies. Les dépôts de sable accumulés sur l'estran peuvent être repris par les vents du large et transportés vers l'intérieur des terres (transport éolien) Ils sont déplacés au ras du sol et s'arrêtent en avant et en arrière des obstacles, suivant un profil assez analogue à celui des dunes et des amoncellements de neige. La pente amont est de $1/3$ à $1/4$; celle d'aval, plus abrupte, $1/1$ et plus. Les dunes peuvent constituer des accumulations énormes; en Gascogne, jusqu'à 100m. de hauteur et 7km. de largeur. On favorise la formation et la fixation des dunes par des plantations appropriées: oyats, tamaris, sapins.

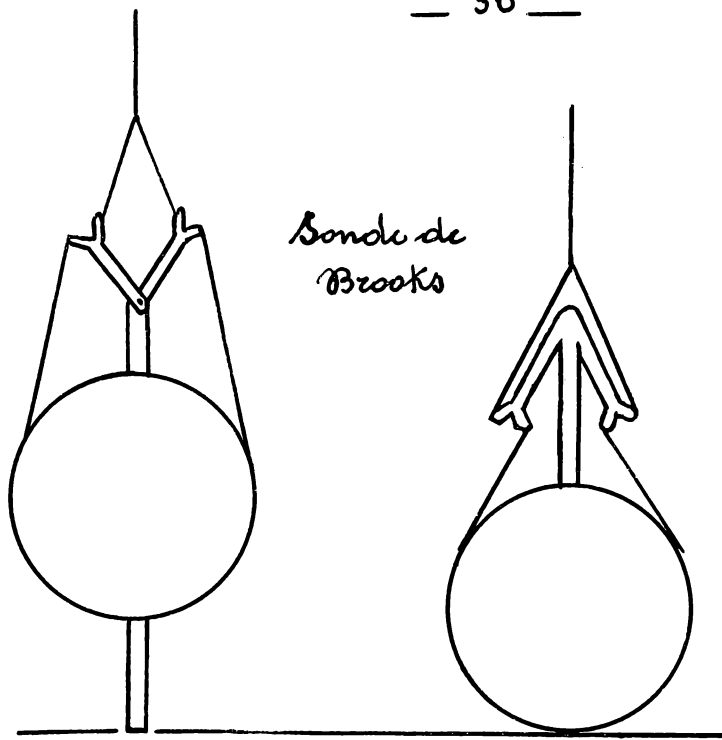
7 Action sur les fonds. L'action des courants locaux et des vagues sur les fonds est aussi importante, surtout au point de vue des accès des ports et des profondeurs dans les rades ouvertes. Les actions qui interviennent sont les courants de marées, de vitesse constante sur toute la hauteur, les courants locaux, le flot de fond et l'action propre des vagues. L'observation montre que les matériaux du fond sont tenus en suspension et déplacés même aux grandes profondeurs; des vagues très violentes peuvent même les immerger en surface par des fonds de plus de 20m. Cela se remarque d'ailleurs au trouble de l'eau lors des tempêtes, même par des

fonds de l'ordre précité. Le charriage est donc très important sur les fonds et donne lieu à la formation de banes (dépôts) et de chenaux (affouillements) les mouvements sont évidemment conditionnés par les circonstances locales et doivent être déterminés par les observations hydrographiques. Le but est non seulement de connaître les profondeurs, mais aussi de rechercher les dispositions à donner aux travaux et aux dragages pour les rendre efficaces. Ainsi, il sera évidemment avantageux de draguer dans les endroits où un courant favorable existe ou peut se produire et de déposer les dépôts en un endroit où les courants l'emporteront vers le large ou tout au moins le laisseront sensiblement en place mais ne le ramèneront pas à son origine.

Relevés hydrographiques. - Nous n'insisterons pas spécialement sur les relevés au point de vue de la navigation, bien que ce soit leur office essentiel. Ils servent alors à établir les cartes marines, au moyen desquelles les navigateurs déterminent leur route, surtout au voisinage des côtes, pour éviter les hauts fonds, les récifs et les brisants. Elles donnent des courbes d'égales profondeurs, dites courbes bathymétriques, rapportées à un zéro conventionnel, généralement un niveau caractéristique de basse mer.

Des relevés spéciaux sont nécessaires en vue des travaux importants. On les exécute au moyen de sondage, dans des embarcations à moteur; on sonde par points; la position de chaque point est fixée en faisant du bateau des visées au sextant sur trois mâts - repères plantés sur la rive.

Pour les fonds de moins de quatre mètres, on se sert de la tige de sondage graduée à plateau d'imbase. On prend la lecture moyenne entre le creux et le sommet des vagues. De 4 à 20 m., on emploie le plomb à sonde. C'est un cône allongé, de plomb, de 7 à 8 kg⁰⁰, attaché à une cordellette de chanvre ou mieux à un fil métallique, assez souple, car le degré d'humectation et de tension fait varier la graduation de la cordellette. Le lien est gradué en mètres; les sous-multiples sont estimés. Pour les grandes profondeurs, on emploie la sonde de Brooks, composée d'un boulet creux coulissant sur une tige et accorché par deux cordellettes à deux leviers articulés au sommet de la tige. Les leviers reçoivent l'attache du câble de suspension, dont



Sonde de Brooks

la tension les retire de telle sorte que le boulet reste accroché. Lorsque la tige touche le fond, la tension du câble mollit et le boulet se décroche. Le mou du câble indique que le fond est atteint. On mesure la longueur du câble déroulé. On reconnaît la nature du fond en y faisant traîner un

petit godet terminé par une poche en toile. On peut effectuer des prises d'eau à divers niveaux au moyen de récipients à obturation commandée à la surface. Les vitesses et directions de courants se déterminent par des moulinets à tiges suspendus ou à câbles; on peut aussi, en surface, employer des flotteurs.

Chapitre II

Ouvrages de protection des côtes - Digues :

1 Protection des côtes

Les raisons et les buts des ouvrages de protection des côtes résultent à suffisance du chapitre précédent. La partie non protégée de la côte belge près de la frontière néerlandaise recule de 5m. par an (plage de sable) les falaises du cap de la Hève reculaient de 2m. par an avant les travaux de défense. On observe des avances importantes de la mer sur les côtes anglaises du Yorkshire, dans la mer Noire, etc. ...

Les travaux dépendent de la nature de la plage, de la profondeur de la mer et de la violence des lames. (l'attaque des côtes est moindre aux grandes profondeurs, ce qui montre l'action importante des lames de fond), ainsi que de l'importance de l'hinterland à protéger. Les dépenses

importantes d'établissement et d'entretien des ouvrages ne se justifient que s'il s'agit de protéger des terrains exploités et de rapport : cultures, localités et stations balnéaires.

On emploie les épis, ouvrages normaux aux côtes, et les ouvrages longitudinaux : murs, digues ou perrés.

Les épis ne s'emploient que dans les plages de sable et de galets le long, auxquelles existent des courants littoraux. Ils sont normaux aux côtes ou légèrement obliques vers l'amont du courant. Ils sont plongés de relief presque nul à la laisse des plus basses mers, ils s'étendent vers les côtes jusqu'au-delà de la laisse des plus hautes mers d'une longueur suffisante pour bien s'ancre dans la côte et ne pouvoir être pris à revers par les lames de tempête. Leur pente est légèrement supérieure à celle de la plage et leur tête est arasée peu au-dessus du niveau des hautes mers d'équinoxe, lorsque celles-ci peuvent se développer librement sur l'estran.

Si un ouvrage longitudinal retient les eaux, les épis viennent s'arrêter à son pied, en liaison avec lui. L'écartement des épis varie de 1 à 1,5 fois leur longueur. Les alluvions s'accumulent entre eux ; il en résulte un engraissement de l'estran.

Sur les plages de sable, les épis se font de préférence en fascinaiges ou clayonnages, fixés dans le sol par de forts piquets de chêne ou de hêtre, de 1,20 à 1,80 m. de longueur, espacés de 0,50 et terminés. On leur donne un profil en dos d'âne avec des butées latérales en pente très douce. On les revêt superficiellement de pierres de l'estage, de forme régulière et posées à la main, de dimensions assez grandes (0,25 à 0,50 d'épaisseur, et plus) en roche dure et inaltérable, ou en béton riche moulé. L'origine de l'épi affecte souvent la forme d'un mur arrondi, peu saillant, mais assez large, confectionné de préférence en plateforme de fascinaige lestés de gros moellons (400 à 600 Kgs)

On peut établir des épis en charpente, dans les plages de sable et surtout dans les plages de galets. Le type le plus simple comporte une cloison verticale de vannage retenue entre deux rangées de pieux moisis ou coulissant dans des rainures pratiquées dans les pieux en file simple. Les éléments sont en bois ou de préférence en béton moulé d'avance. Lorsque la paroi est assez haute, on consolide parfois la rangée de pieux principale par des poussoirs et tirants sous le vent, prenant appui sur les têtes d'une rangée parallèle de pieux. Les pieux sont distants de 1,25 à 1,75 m. ; les cloisons ont 8 cm. d'épaisseur. On peut substituer aux cloisons des bottes de fascinaige ou des saucissons lestés ; on peut établir une double paroi, éventuellement à claire-voie et dont l'intervalle est rempli de pierres. Sur les plages de galets, on peut aussi organiser de simples levées de gros galets. Selon le but proposé, on peut combiner les divers systèmes.

Les ouvrages longitudinaux constituent une protection plus directe. Ils fixent artificiellement la laisse de haute mer. Selon la hauteur à laquelle le niveau moyen peut s'élever au dessus de leur pied lors des plus hautes mers, ils peuvent être exposés à des actions plus ou moins violentes des lames, dont nous apprécierons l'importance à propos de l'étude des jetées. Nous n'envisageons donc ici surtout que les ouvrages établis assez loin de la laisse de basse mer.

Sur les plages de sable, la protection la plus simple est réalisée par les dunes littorales dont on peut organiser la constitution par l'établissement d'obstacles : palissades fermées ou à clairevoie, haies, gabions, bottes de branchages. Lorsqu'ils sont sous le point d'être emportés sous le sable accumulé par le vent, on relève les dispositifs ou on en établit de nouveaux légèrement en arrière. On arrive ainsi à protéger et fixer la côte et à empêcher la propagation du sable vers l'intérieur. Cette méthode simple ne peut toutefois convenir pour la protection des agglomérations, stations balnéaires et terrains cultivés.

Sur les côtes basses, on a recours à de véritables digues, assez larges en couronnement (généralement des promenoirs), établis au-dessus du sommet des plus hautes lames et protégés vers le large par de solides revêtements. Les actions des lames seront d'autant plus violentes que le talus est plus abrupt; d'autre part une pente très douce augmente la surface du talus et la largeur de l'ouvrage. Pratiquement l'inclinaison varie de $1/4$ à $1/4$, en moyenne $1/2$ (côtes belges) à $1,3$ (côtes néerlandaises). Il y a sensiblement équivalence des effets et de la dépense, ainsi qu'il résulte des observations pratiques et des essais de laboratoire du professeur Engels. Le dernier recommande aussi un type à parement courbe, avec talus de pied assez long à $1/4$, suivi d'une courbe de raccordement à inclinaison finale verticale. Le type a été employé avec succès à Scheveningue; il exige une moindre largeur. Les parements allemands à double courbure sont pratiquement abandonnés; ceux à simple courbure peuvent convenir, mais la pente initiale doit être très progressive (cycloïde).

Une précaution générale, analogue à celle des perrés de rives des cours d'eau, consiste dans la protection contre les affaiblissements du pied. Le pied sera toujours retenu par un parafoinille composé d'un massif de béton protégé à l'avant par des palplanches jointives retenues par une file de pieux solidarisés par un chapeau. Aux endroits menacés, on bat parfois en avant du perré des grappes de pieux en quinconce, dont les têtes dépassent, et qui ont pour but de briser l'impulsion des lames et d'empêcher le ressac. Ensuite, il faut protéger le terrain sous le perré ou le mur contre l'intrusion. Il faut donc établir le revêtement sur une couche de béton maigre,

ou de gravier, ou de fascinages ou de paille. Les branchages sont retenus par des piquets timés ; ceci s'emploie surtout au pied des percés droits ou courbes. La paille peut être fixée par introduction dans le sol au moyen du planteur. Sur l'argile, on peut établir directement le béton ou la maçonnerie au mortier, mais il faut alors établir un drainage.

Comme revêtement, on emploie les briques dures et les pierres dures non gélives, maçonnées au mortier de ciment-trass ou le béton, soit en blocs moulés d'avance, soit moulé en place. Il faut alors réserver des joints pour le retrait et la dilatation. Le béton moulé d'avance a l'avantage de n'être pas soumis à l'action de l'eau de mer avant durcissement. Pour le moulage en place, le principe du système de Marshall est recommandable. Des dalles de 1,80 x 2,40 environ sont moulées en place entre coffrages amovibles (pontres et madriers) leur épaisseur moyenne est de 7,5 à 12,5 cm. ; dans le système original, la surface affecte la forme de marches d'escalier peu élevés. Les joints de 25 à 35 cm. de longueur réservés entre ces dalles sont ensuite bétonnés de façon à former un quadrillage en béton armé ; solidarisé avec une forte pontre de pied de 0,35 x 0,76. On réserve des joints de dilatation. Les dalles sont armées de préférence de métal déployé. On prend des précautions spéciales pour protéger le béton contre le délavage par l'eau de mer. Les résultats sont bons. Éventuellement les dalles et pontres sont solidarisés avec des piquets en béton armé. La cuirasse Decauville, analogue au système Villa, consiste en un rideau souple de briques de béton percées et enfilées sur des fils d'acier enroulés.

Le béton armé permet de multiples formes, inspirées de celles des percés et murs de soutènement construits dans ces matériaux. Les contre-forts, semelles et épousins ou tirants d'ancrage peuvent jouer un rôle important. Pour la protection des talus d'argile, assez raides, ou des talus en roche tendre, on peut établir en avant des levés de pierres, plus ou moins organisés et retenus par des piquets, fascinages, etc. On peut éventuellement les maçonner si la protection contre l'affouillement est réalisable. Leur but est de briser les lames avant qu'elles n'atteignent le talus et de retenir les terres éboulées. Les levés finissent par être l'origine d'un talus concave, que l'on peut progressivement revêtir dans la suite.

Les falaises rocheuses peuvent être consolidées au pied par des murs et piliers en maçonnerie.

2 Fixation des dunes. Nous avons vu comment on peut organiser la formation des dunes dans un but utile de protection des côtes. Mais il arrive que, sous l'effet du vent, le déplacement du sable continue et se propage vers l'intérieur, en créant, comme en Gasco-

gne à l'embouchure de la Gironde, de grandes étendues incultes et on enfonçant même des localités. Il faut prendre des mesures de protection contre ces déplacements calamiteux des dunes en procédant à leur fixation par des sapins, des tamaris ou des oyats. Les résineux ont été employés avec succès en France; les oyats en Belgique. L'oyat ou roseau des sables (*Ammophyla Arenaria*) a des racines de 2 à 3 m. de profondeur en moyenne, mais atteignent jusque 8 et 10 m. Les plantations se font par touffes en quinconce, espacées de 30 cm. Les plantes se reproduisent par semis sous l'action du vent et par les racines. La végétation se fait grâce à l'eau imprégnant le sable, par précipitation et condensation nocturne. Les jeunes plantations, surtout de sapins, doivent être protégées contre l'enfoncement par une couverture de branchages. Les arbres adultes fixent non seulement la dune mais protègent l'hinterland contre l'invasion du sable.

3. Digues — On appelle digues des levées protégeant de l'invasion de la mer ou de la marée des terrains bas qui seraient sinon submergés d'une manière permanente ou intermittente. Une grande partie du territoire néerlandais est ainsi protégée par des digues. Actuellement des travaux sont en cours pour séparer le Zuiderzée de la mer du Nord par une digue. Le Zuiderzée deviendra ainsi un lac intérieure, dans lequel quatre digues créeront de grands polders bien protégés. On a été jusqu'à construire récemment en Allemagne une digue, dite Hindenburg, reliant à la côte l'île de Sylt et portant une double voie ferrée, d'utilité probablement militaire. Les ouvrages se caractérisent par de grandes dimensions, des difficultés d'exécution souvent grandes et un prix élevé, à cause des grandes quantités. Ce sont des ouvrages de spécialistes, demandant des études préalables approfondies et pour lesquels des expériences bien conduites peuvent éventuellement remplacer avec avantage l'expérience, c'est-à-dire la routine. Les ouvrages sont généralement en terre et comportent un talus très doux vers le large, éventuellement variable, de $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{2}$ et même moins. Sur la hauteur de fluctuation de marée et au dessus, le talus est revêtu d'un perré construit selon les considérations des paragraphes précédents. Pour la digue du Zuiderzée, le corps en terre sableuse perméable de la digue est remblayé hydrauliquement, derrière un massif épais, de "keileem", argile glaciaire à galets qui, après tassement est très résistante à l'action des vagues. Le talus d'argile est revêtu de fascinaux au pied et perré au dessus de basse mer. Le couronnement du talus doit être au dessus du niveau des plus fortes vagues de tempête; cela peut se réaliser par un parapet de 1,5 à 2 m. d'épaisseur en crête. Souvent, en arrière du parapet, on établit une large plate-forme servant aux communications; grand

route et double voie forcée sur la digue du Zuidvoezie, double voie forcée sur la digue Hindenburg. Le talus intérieur est éventuellement plus incliné que l'extérieur et revêtu selon les besoins. S'il est émergé, il peut être simplement gazonné ou planté et drainé.

On peut disposer l'argile d'étanchement en noyau au centre de la digue (Hindenburg) mais ce système est moins avantageux, tant pour le principe que pour l'exécution, que le revêtement étanche extérieur, appliqué par la pression de l'eau. Les fascinaux, surtout sous forme de plateaux lestés, peuvent être d'une grande utilité pour l'assise des digues sur les fonds très vaseux, aux endroits assez profonds et pour la fermeture des derniers tronçons. Au Zuidvoezie, on développe l'assise d'argile à galets en ces endroits. Les difficultés d'exécution pouvant provenir du mauvais terrain d'assise, des profondeurs et surtout des courants, ceux-ci correspondant en général aux profondeurs. Au fur et à mesure que la digue s'établit, les courants se concentrent et peuvent devenir plus violents, bien que l'action des marées, des vents et des courants doive s'affaiblir dans le bassin partiellement endigué. La construction d'une digue doit être précédée d'une étude très attentive des fonds et des courants, ainsi que de leur régime. Pour la fermeture finale, il faut disposer de moyens surabondants et conduire le travail à son terme après une préparation soignée; il faut observer que l'on dispose alors de l'expérience acquise dans toutes les phases précédentes de l'exécution. Si un écoulement permanent doit être maintenu (Zuidvoezie), on construit d'avance les ouvrages d'évacuation à l'abri de batardaux. S'ils sont bien placés et dimensionnés, leur action peut faciliter la fermeture. Pour celle-ci, on aura éventuellement recours à des pieux et palplanches comme auxiliaires d'exécution.

Pour de tels ouvrages, il faut une excellente organisation du travail et des moyens puissants: digues, chalands, machines de refoulement, excavateurs, etc.

Chapitre III

Ports maritimes

1 Généralités. Les ports maritimes sont les endroits où les voies maritimes se raccordent aux voies terrestres. Leur accès doivent être également bien assurés par les deux voies. Les opérations s'effectuant dans les ports sont le chargement, le déchargement, le transbordement et l'entreposage des marchandises; l'embarquement et le débarquement des passagers, le ravitaillement en combustible, eau et vivres, l'entretien et la réparation des navires. Enfin les ports servent également d'abri en cas de tempête.

Au point de vue du trafic, on distingue les ports de commerce général, les plus grands, les ports de vitesse, pour voyageurs et les ports d'iscale, les ports de pêche, et les ports spécialisés ou particuliers, enfin les ports de guerre. Les distinctions influent évidemment sur les dispositions du port. Les ports de commerce général doivent surtout disposer de grands bassins, dans lesquels les marchandises peuvent éventuellement séjourner sur bateau ou allège (stock flottant), des quais étendus et bien outillés, de grands terrains de stockage ou de vastes entrepôts, des raccordements ferrés, routiers et fluviaux développés. Les ports sont souvent à quelque distance dans l'intérieur des terres, sur des fleuves à marées ou des canaux maritimes, à proximité des centres ou régions commerciales de consommation et de production (Anvers, Rotterdam, Londres, Brême, Rouen, etc.)

Les ports de vitesse exigent l'accès facile des grands transatlantiques, sans perte de temps. Ils doivent donc être à la côte même et accessibles en tous temps; ils doivent avoir de grandes profondeurs et tous les accessoires importants qui exigent les grands navires à passagers: formes de radoub profondes, etc. Ce sont donc les ports qui exigent les travaux les plus difficiles (Le Havre, Liverpool, Southampton, Bremerhafen). Très souvent ces ports constituent des sortes d'avant-ports de ports de commerce général.

Les ports d'iscale diffèrent des précédents par la brièveté de l'arrêt; les installations nécessaires sont donc beaucoup moindres et le caractère principal que doit présenter un tel port est d'être bien placé par rapport à la route des navires (p. ex. Cherbourg pour les passagers, Gibraltar et Aden pour le ravitaillement en charbon)

Les ports de pêche ont fait l'objet dans ces dernières années et dans divers pays, d'aménagements très spéciaux en vue de développer l'industrie de la pêche dans des centres déjà anciens. Ils tendent à rationaliser cette industrie par l'emploi de bâtiments à vapeur assez importants et de méthodes perfectionnées de pêche. Au point de vue maritime, les dispositions sont d'ordre moyen; l'intérêt de la question réside plutôt dans les dispositifs spéciaux: frigorifiques, maintenance et expédition, etc. qui sont d'ordre industriel.

Les dispositions des ports spéciaux et privés sont de même complètement déterminées par le but particulier, c'est-à-dire les produits mentionnés: charbon, minerai, etc. Ils se caractérisent surtout par des moyens spéciaux de maintenance mécanique, destinés à réduire la durée et la dépense des opérations.

Au point de vue de leur situation, on distingue les ports côtiers et les ports intérieurs. Les ports côtiers naturels sont établis au fond de

bais convenablement abrités (Brest, Boulogne) soit dans une lagune en communication avec le large par divers bras ou chenaux (Venise et autres ports italiens) Les ports côtiers artificiels sont formés de bassins creusés dans le littoral et réunis à la mer par un chenal d'accès (ports à jétées tels que Ostende, Dunkerque, etc.) ou formés de superficies d'eau emprises sur la mer, limitées et abritées par des constructions en eau profonde : jétées, mâles, digues (ports en eau profonde tels que Ymuiden, Leebrugge, Cherbourg, etc.) Les derniers ports portent parfois le nom d'avant-ports lorsqu'ils sont reliés à des bassins, creusés dans le littoral par un canal d'accès (Bruges, p. exemple)

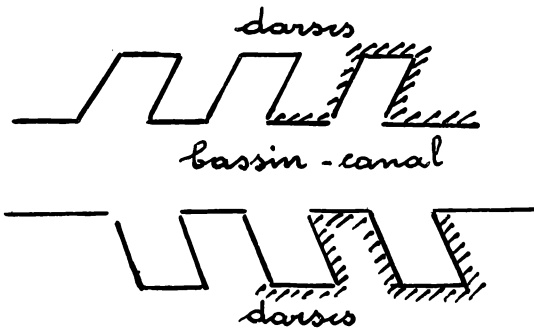
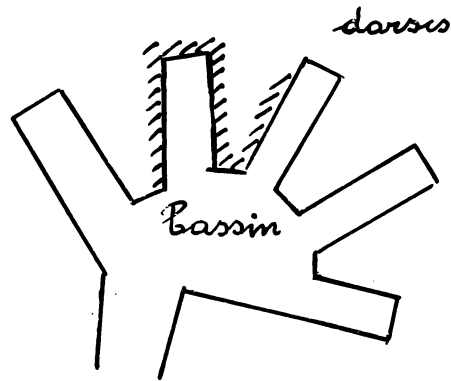
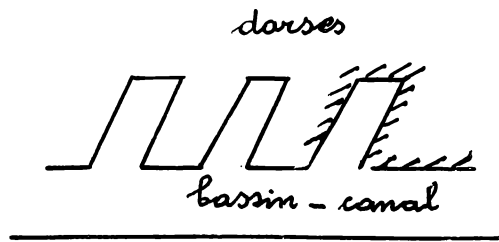
Au point de vue du régime, on distingue les ports de mouillage accessibles en tous temps; on les appelle encore ports en eau profonde dans les mers à marée. Les ports à marée sont accessibles seulement pendant un temps plus ou moins long aux environs de marée haute. Ils constituent des ports d'échouage lorsqu'ils sont en communication directe avec la mer et que les bâtiments échouent à marée basse. Pour les grands ports de quelque importance, on crée des bassins à flot, séparés du large par des écluses, où règne constamment un niveau voisin de marée haute et où les navires restent à flot.

2 Ports intérieurs. Les ports intérieurs doivent leur raison d'être à la grande facilité des installations maritimes : espaces considérables, accès et exécution faciles, et à la grande supériorité des accès par voie ferrée, par route et par voies navigables. En outre, les grands centres commerciaux ont pu se développer dans les lieux bénéficiant d'un bon accès direct à la mer, tout en étant suffisamment à l'intérieur des terres pour être abrités des actions de la mer. Les rivières à marée, par les bonnes profondeurs qu'elles conservent dans la majeure partie du domaine fluviomaritime ont pu ainsi permettre le développement de très grands ports. Par exemple Rotterdam, Hambourg, Rouen qui ne possèdent pas de bassins à flot, Anvers, Bordeaux, Londres, pourvus de bassins à flot. Les ports, établis sur des rivières maritimes, sont des ports naturels. Dans certains cas, les avantages résultant de la création d'un port maritime ont paru si puissants que l'on n'a pas hésité à créer de toutes pièces des ports artificiels en reliant de grands centres à la mer par des canaux maritimes (Gand, Bruxelles, Bruges en Belgique accessibles aux bateaux calant 6,50m; Amsterdam sur le canal de l'Y en Hollande, d'un mouillage de plus de 9,80m. et qui va être porté à 12,50m, puis à 15,00m.) Le succès ne répond pas toujours immédiatement à l'attente. En Belgique, il n'y a guère que Gand qui présente actuellement un trafic important. Néanmoins ces canaux maritimes et ports intérieurs constituent en même temps d'excellents moyens de navigation intérieure; on constate que des établissements industriels s'établissent rapidement sur les rives, surtout si elles sont toutes deux bor-

dés de voies ferrées. Le canal devient ainsi un port sur presque toute sa longueur pour autant que le stationnement ne gêne pas la navigation.

Les ports naturels en rivière peuvent trouver le long des rives concaves des profondeurs suffisantes, même à marée basse; on y établit des murs de quai (Anvers) ou des appontements et des corps-morts d'amarrage. Lorsque les étendues disponibles en eau profonde sont insuffisantes, on y ajoute des bassins, creusés dans les rives du fleuve et ouverts directement sur celui-ci ou séparés par des écluses dans les rivières à marée (bassins à flot, Anvers.)

Actuellement, aussi bien dans les ports naturels (Anvers) qu'artificiels (Gand), les bassins, ou darses s'établissent en dents de peigne, en arête de poisson ou en rayons sur un bassin-canal servant à la circulation et au virage. Le bassin-canal est éventuellement séparé du fleuve par des écluses, comme à Anvers. Les darses s'établissent au fur et à mesure des besoins.



La profondeur des bassins est à 0,50m ou 1,00m. en dessous du seuil des écluses, en vue de créer une marge d'invasement. Le bassin-canal aura de 300 à 500m. de largeur, pour permettre aux navires de tourner. Les darses auront 100 à 250m. de largeur et guère plus d'un kilomètre de longueur pour éviter la houle. Pour des bûtes

spéciales, tels que le transbordement en arêtes du charbon, des minerais et des grains (par élévateurs, p. ex.), on peut devoir créer des darses plus larges (400m. à Anvers). Les largeurs des mâles varient de 50 à 200m. Les darses sont inclinées sur le bassin-canal d'un angle de 45° à 60° et l'entrée est de profondeur évasée, afin de faciliter l'accès des navires, qui ne peuvent naviguer par leurs propres moyens que suivant un rayon de 1000 à 1500m. Pour de plus petits rayons, il faut le secours de remorqueurs.

Les toves-pleins sont creusés à 2 ou 3m. environ au-dessus de marée haute.

Dimensions des navires. Les bateaux de pêche ont des dimensions moyennes d'environ 30m. de longueur, 6 à 8m. de largeur et 3 à 4m. de tirant d'eau. Les plus grands ont environ 50x10x5 max., comme les caboteurs. Les plus grands cargos à vapeur ont actuellement 100 à 130m. de longueur, environ 20m. de largeur et 8m. de tirant d'eau (cargos de 10.000 tonnes) Les paquebots à voyageurs ont dépassé les dimensions de 300x30x11,50; ces grands bâtiments sont cependant encore exceptionnels. Il est probable que les dimensions des navires continueront à s'accroître. Cependant l'état actuel des grands ports et des canaux maritimes ne permet pas de dépasser le tirant d'eau maximum indiqué ci-dessus et les autres dimensions sont assez limitées de ce fait même.

En appelant L la longueur totale, l la largeur au maître couple et t le tirant d'eau, on a:

	Navires en bois	Cargos en fer	Paquebots rapides.
$\frac{L}{l \cdot t}$ =	3 à 5	7 à 9	9 à 10
$\frac{L}{t^2}$ =		0,55	0,40
$\frac{L}{l}$ =		0,05	0,04 à 0,03

Actuellement, dans un port de commerce accessible aux grands cargos, on doit donc envisager comme superficie maximum d'une porte d'amarrage 125 ou 150 x 20

Le tonnage de déplacement d'un navire, équivalent au poids du cube d'eau déplacé, s'exprime en tonnes de 1000 Kg. Le port en lourd est le poids de marchandises transporté. La première caractéristique s'applique aux navires de guerre et à passagers, la seconde aux cargos. Pour ceux-ci, on distingue aussi la jauge brute, nette ou légale, exprimée en tonneaux de 100 pieds cubés anglais de 2,83 m³. La jauge brute correspond au cube du navire, y compris ses superstructures, tandis que la jauge nette s'obtient en retranchant les espaces strictement inutiles au transport des marchandises ou voyageurs. La jauge légale est conventionnelle.

4 Ports côtiers - Rades et avant-ports.

On appelle rade une surface d'eau assez grande située en avant d'un port et abritée en tout ou en partie contre les tempêtes par des îles, îlots ou hauts fonds. Une rade bien abritée est dite fermée; elle peut être protégée par des îles (La Gallice) ou être constituée par une baie communiquant avec la mer par une passe étroite (Brest, Boulogne, Portsmouth) Une rade peu abritée, p. ex. par des hauts fonds, est dite foraine (Dunkerque, St. Nazaire, Le Havre) Les rades précédentes sont naturelles; on peut, par des constructions s'éloignant des côtes, créer des rades artificielles, mais qui constituent alors le plus souvent des avant-ports, de dimensions plutôt réduites, mais pourvus de murs accostables.

Une rade doit être bien abritée, assez profonde pour que les navires ne puissent pas talonner et bien gouverner, au moins 13 à 14 m. Elle doit être vaste pour permettre aux navires d'évoluer, de virer et d'arrêter (briser l'avec). Le fond doit être ferme, mais de nature telle que l'ancre morde dans le sol et que les navires ne puissent chasser sur l'ancre. L'argile, le sable marneux, la vase compacte conviennent; le roc, le sable dur et la vase mobile ne conviennent pas. Le navire doit pouvoir disposer d'une touée ou longueur horizontale égale à cinq fois la profondeur. S'il ne mouille qu'une seule ancre, le navire peut donc dériver sous l'effet du changement de direction du vent un cercle d'évitage d'assez grand rayon. Dans les rades étroites, pour éviter cette dérive, on mouille deux ou quatre ancres.

L'entrée et la sortie de la rade doivent être faciles par tous temps; il faut donc des passes assez larges et profondes pour permettre l'entrée aisée et rapide des navires. Un excès de largeur favorise toutefois la propagation des lames et n'est pas désirable; 500 m. est une bonne largeur. Certaines rades offrent deux passes (Plymouth, Cette, Cherbourg), ce qui permet d'emprunter la plus favorable d'après la direction du vent. Celle de Cherbourg est aménagée par une digue convexe vers le large formant la Baie et contenant deux grandes passes de 1000 et 800 m. et une petite passe côtière de 50 m.

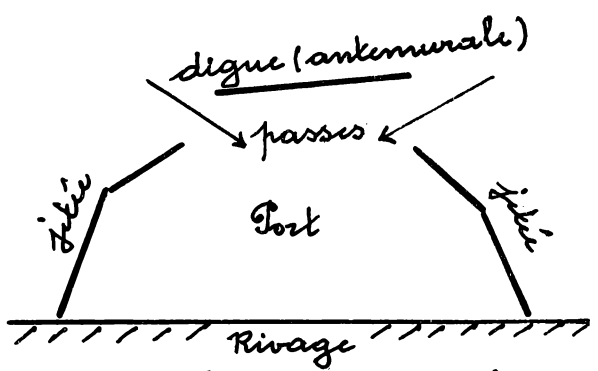
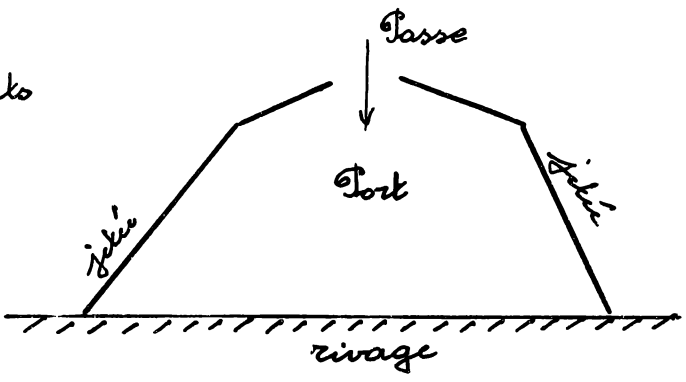
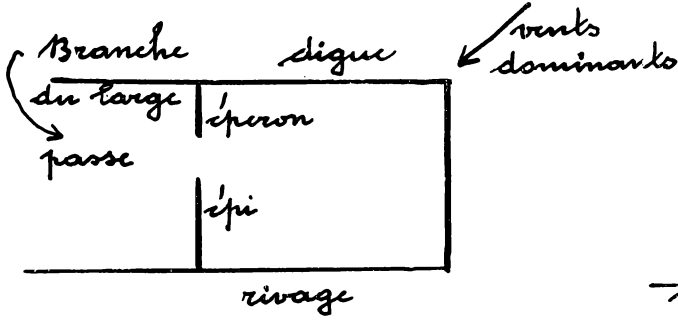
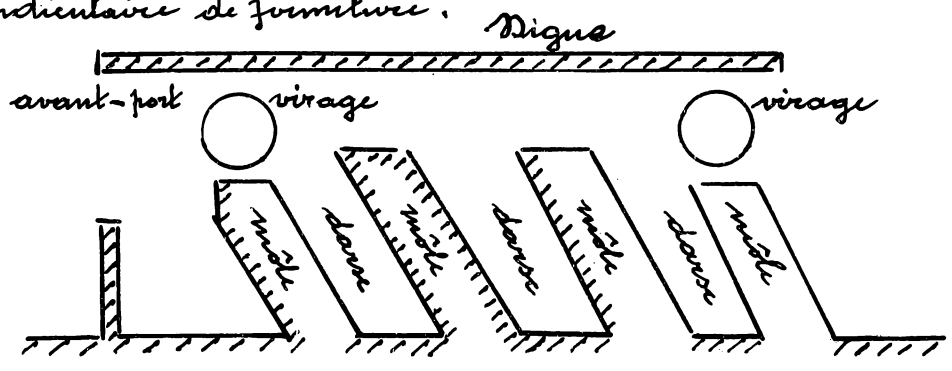
L'amarrage dans les rades se fait par ancres ou corps morts. Ceux-ci comportent des masses pesantes de fonte et de béton (10 à 95^t), auxquelles sont attachés des chaînes, suspendus à des coffres flottants qui portent l'organe d'amarrage (anneau d'attache). Dans les fonds meubles, le corps mort peut être constitué par des pieux à vis enfoncés dans le sol, simples ou jumelés, et formant éventuellement des dues d'albé élevés. Les dormives peuvent aussi être construits en charpente de bois, ou actuellement, en béton armé. Le transbordement des voyageurs en rade, par le moyen de vedettes, est avantageux si la rade est bien abritée; par contre, celui des marchandises par chalands ou chaloupes est très onéreuse, aléatoire et ne peut être que provisoire.

5 Ports côtiers sur côtes rocheuses. La plage est stable, les mouvements d'alluvions sont insignifiants, le rivage est accore, e'est-à-dire abrupt et les grandes profondeurs sont voisines de la côte. On ne doit se préoccuper que de l'installation des ouvrages du port sur terrain solide, sans considération d'entretien des profondeurs. Par suite de la nature rocheuse du terrain, le port est généralement réalisé en eau profonde, par l'emprise de superficies d'eau sur la mer. Les ouvrages à réaliser doivent assurer d'une part la protection, d'autre part l'exploitation. Les ouvrages de protection sont formés de murs appelés môles s'ils sont rattachés directement à la rive, ou par des estacades à claire-voies; digues

s'ils sont isolés en mer ou jûtiés, principalement quand ils déterminent un chenal d'accès. Les ouvrages délimitent avec le rivage l'enceinte du port et réservent les passes d'accès des navires.

Nous avons indiqué à propos de la rade de Cherbourg une disposition avantageuse des digues lorsque le port est au fond d'une baie.

Une disposition très fréquente lorsque le courant littoral est faible et que les grandes profondeurs se trouvent à peu de distance de la côte consiste à établir une digue parallèle à celle-ci. Comme le charriage littoral n'est pas à craindre, on peut d'ailleurs relier la digue à la côte par un môle perpendiculaire de fermeture.



Lorsque les profondeurs sont plus éloignées de la rive, on établit parfois des môles ou jûtiés convergents vers le large, réservant entre eux une passe aux profondeurs convenables. Parfois les murs des deux môles sont très écartés et l'intervalle est protégé en avant par

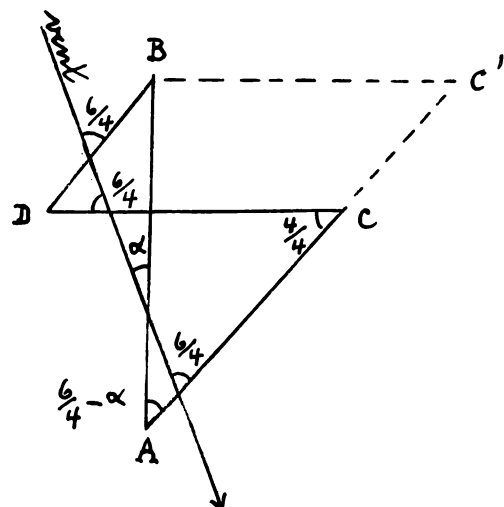
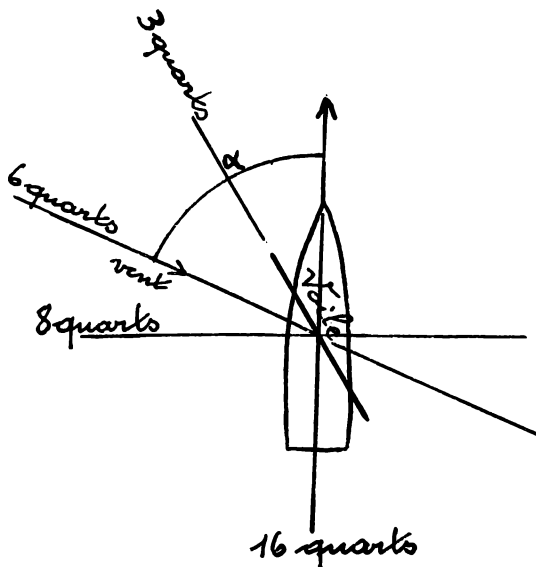
une digue isolée (antemurale des Italiens), ce qui réalise deux passes d'accès latérales. Les dispositifs ne conviennent toutefois qu'en cas de charriage insignifiant.

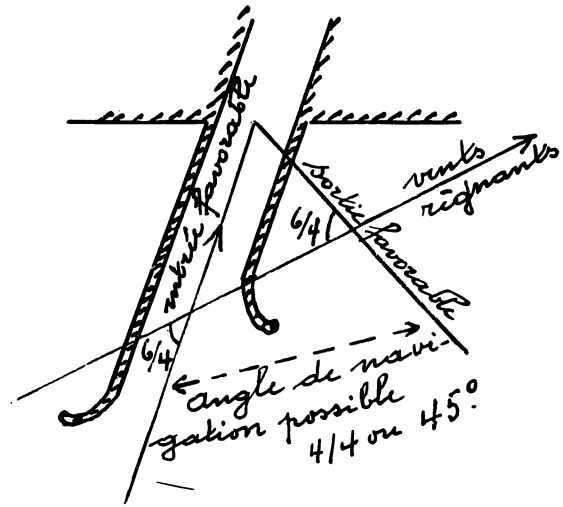
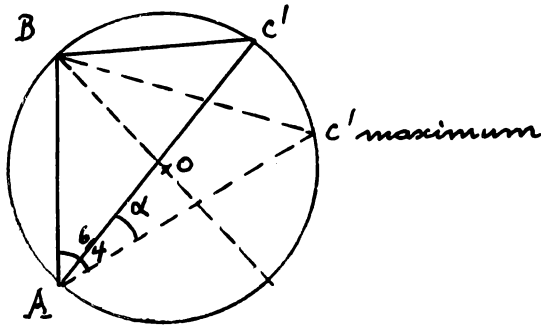
Les digues parallèles au rivage ont l'avantage de permettre une extension considérable en longueur, le port se développant le long de la côte (Marseille, Alger, Gênes, etc.)

Les môles convergents limitent plus strictement l'espace du port ; ils conviennent bien lorsqu'ils réalisent seulement l'avant-port de bassins intérieurs. (La Pallice) ou qu'il s'agit d'un port de développement limité. Parfois, d'ailleurs, on commence par construire un seul môle, abritant des vents dominants, puis la digue isolée, le second môle s'établissant éventuellement plus tard, alors que les possibilités de développement du port peuvent être mieux appréciées.

L'entrée ou les entrées du port doivent être bien dimensionnées et favorablement orientées. Pour ceci, il faut se rapporter au régime des vents. Si la considération de l'orientation par rapport au vent pour permettre l'entrée sûre des voiliers par tempête a perdu de l'actualité, il est cependant désirable que les bateaux ne soient pas pris par le travers par les vents de tempête dans les passes et dressés sur les mussoirs. Il faut que les navires puissent suivre une route aussi rectiligne que possible et ne doivent pas décrire de courbe de rayon inférieure à 7 fois leur longueur. Les môles convergents, notamment à digue avancée, peuvent assurer de bonnes entrées. Dans le cas des digues parallèles au rivage, il faut parfois protéger l'entrée par un môle perpendiculaire (Alger, Montevideo, Buenos Aires). Si les vents dominants sont parallèles au rivage, on prolonge la digue au-delà de la passe par une branche du large, de 500m., portant un éperon normal d'environ 100m., suivi du portuis de 150 à 200m. Le portuis doit être assez loin du rivage pour que l'entrée soit à l'abri du ressac et que le virage des bateaux ne les amène pas trop près du rivage. Il faut éviter que le portuis soit ouvert aux vents dominants, ce qui favorise la propagation ou la réflexion des lames dans le port.

Au point de vue de la navigation à voiles, il faut noter qu'un voilier navigue "au plus près", contre un vent faisant avec sa route un angle de 6 quarts ($67^{\circ}30'$), parce que l'angle minimum de la voile est 3 quarts. Avec certains bateaux très fins (yachts) on peut naviguer





à quatre quarts. Si l'angle α est inférieure, le navire doit louvoyer. Pour un déplacement AB, le chemin à parcourir est la somme des côtés AC' et C'B d'un triangle dont l'angle AC'B = $4/4$ et BAC' = $6/4 - \alpha$. Le lieu de C' est le segment capable de l'angle $4/4$ décrit sur AB. AB + BC est minimum quand $\alpha = 6/4$ (au plus près) et maximum quand $\alpha = 0$ (vent debout). Si l'on tient compte de l'entrée et de la sortie des bateaux, l'axe de la passe ou du chenal peut être compris entre les deux directions faisant l'angle de $6/4$ avec les vents dominants. L'une favorise l'entrée, l'autre la sortie. Comme en cas de tempête, la facilité d'entrée l'emporte, on oriente généralement l'axe de l'entrée à $6/4$ sous les vents dominants; le mole du côté du vent de bord sur l'autre de manière à éviter que les bateaux entrants ne soient déportés sur le musoir de ce dernier.

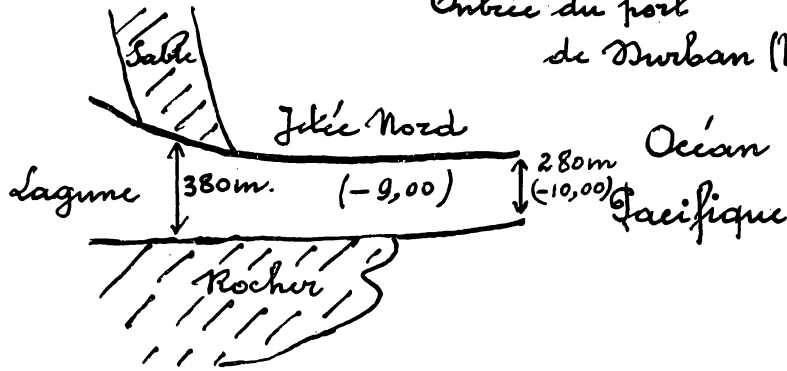
Les installations d'exploitation comportent des quais ou des darses établis le long du rivage, à l'abri des digues. Les dimensions sont les mêmes que pour les ports intérieurs, les darses sont obliques vers l'entrée du port. L'espace entre la digue et les musoirs des môles séparant les darses est l'analogue du bassin-canal des ports intérieurs. Des postes de virage ou d'évitement sont créés au droit de certains môles plus courts. Si certains digues sont peu exposés vers le large, elles peuvent recevoir des postes d'accostage; elles doivent être alors assez larges pour recevoir les voies, les engins de maintenance, éventuellement des hangars ou terre-pleins assez étendus (Alger).

6 Ports côtiers en plage de sable. Si les ports côtiers en plage rocheuse apparaissent ainsi assez exempts d'aliés après qu'il a été possible de les établir, il n'en est pas du tout de même si la côte est mobile, surtout s'il y a un charriage littoral important. La constitution du port doit dans ce cas prévoir également le maintien et l'entretien faciles des profondeurs après leur création. Le problème est très complexe et capital pour l'exploitation du port; sa solution dépend de la nature du port, de sa situation par rapport aux vents et courants, et de l'importance du charriage. Les ports lagunaires, séparés de la mer par un cordon littoral résor-

vant des passes peuvent constituer d'excellents ports ou abris naturels, surtout si un cours d'eau y débouche et maintient la profondeur des passes. Mais même en l'absence de

cours d'eau, le jeu de la marée peut suffire pour maintenir la profondeur dans le goulet. Il faut concentrer les eaux dans ce dernier par le moyen de jetées parallèles bien orientées, prolongées jusqu'aux profondeurs suf-

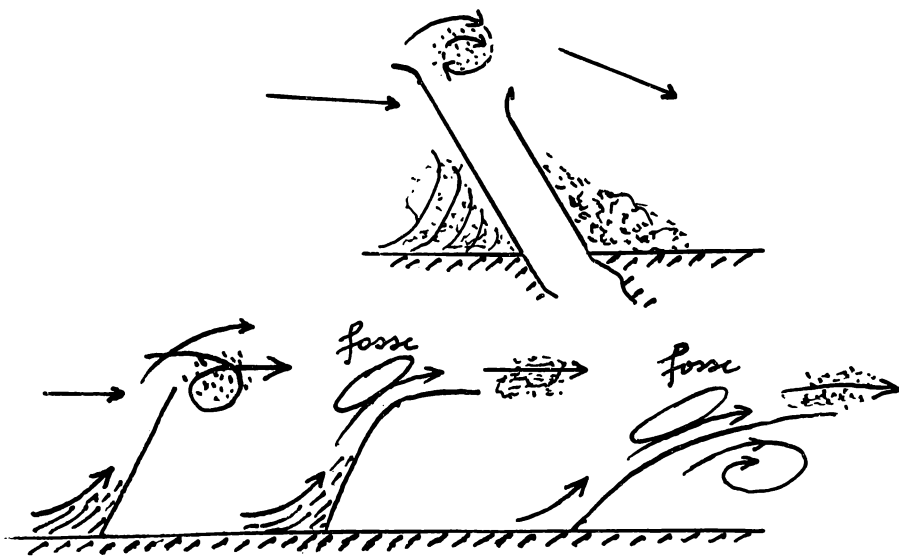
Entrée du port de Durban (Natal)



fisantes. On crée initialement par dragages les profondeurs voulues; la largeur doit être suffisante pour permettre l'afflux de la marée, mais pas trop forte pour conserver une action curante suffisante des courants. Elle atteint 280m sur 10m. de profondeur à Durban (Natal, Afrique) dont l'aménagement a été un succès. La lagune est de 2000ha et l'amplitude des marées d'équinoxe 1,80m. Le volume de marée est de 20.000.000 m³. Une barre à profondeur moyenne de 1,80m. sous marée basse a été portée à 10m. par dragages et s'est maintenue.

Le plus souvent en terrain meuble, on crée un port intérieur plus ou moins artificiel, dans une anse, crique, embouchure de petite rivière ou même tout à fait en terrain ferme. On creuse des bassins et darses à marée ou à flot, d'après les dispositions générales précédemment décrites et on les met en communication avec la mer par un chenal, prolongé en mer jusqu'aux profondeurs suffisantes par des jetées. Dans les anciens ports (Calais, Dunkerque, Ostende) ces jetées étaient parallèles. Elles dérivent

des jetées parallèles employés pour prolonger en mer les rives des estuaires. Il a été exposé dans le cours d'Hydraulique fluviale quels sont les effets de ces jetées s'il y a un charriage littoral important. L'estran s'engraisse en



amont de la jétée qui reçoit l'action du courant, jusqu'à ce que le charriage atteigne le musoir et le franchisse. Au delà de l'extrémité du musoir, les remous produisent un haut fond, qui constitue une barre à l'entrée du chenal entre jétées parallèles. C'est ce qui a été constaté partout généralement. Les jétées parallèles facilitaient anciennement le halage des bateaux à voile à l'entrée de la sortie en cas de vent contraire, mais est avoué à peu de toute actualité par le développement de la navigation à vapeur et du remorquage. Le développement des ports a conduit à accroître l'écartement des jétées (120 m. à Dunkerque, 135 m. à Calais) et la profondeur du chenal (3 à 4 m. sous basse mer, ou plus)

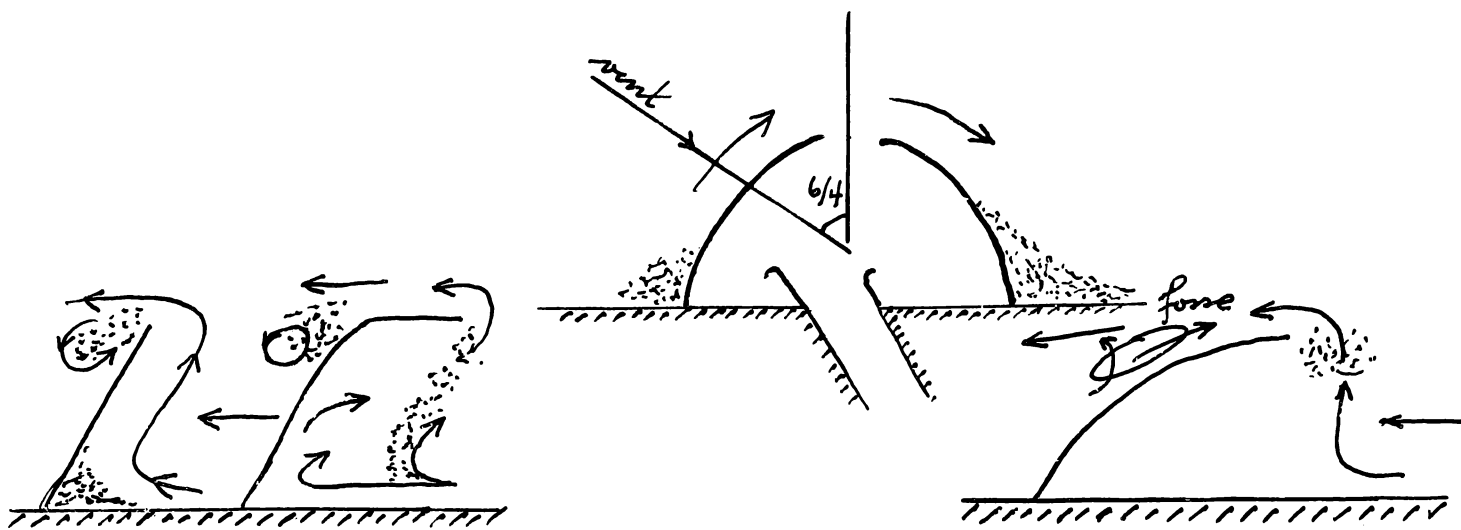
L'entrée est parfois évasée; on ne dépasse toutefois guère 150 à 180 m., pour éviter la propagation de la houle et les réflexions possibles des lames. Néanmoins, les lames se propagent ou se réfléchissent dans le chenal et créent une agitation dangereuse dans l'avant-port. On cite le cas caractéristique de l'agitation créée dans l'avant-port de Cherbourg par la réflexion de lames sur une jétée et que l'on a dû éviter par un épi construit à l'endroit où un récif jouait le même rôle avant son enlèvement inconsidéré. Pour réduire la propagation des lames, ou éviter leur réflexion, on établit en des endroits bien choisis des jétées, des brise-lames ou chambres d'épanouissement. Ils ont une longueur égale à celle du chenal; leur seuil est à une profondeur croissant avec la force des courants à débiter, généralement entre MBVE et MBME en France. Le plafond est incliné d'environ 1/8. On place parfois le premier près du musoir le plus exposé au choc des lames, puis alternativement dans l'une et l'autre jétée. Le plafond est poussé assez haut pour que les lames s'épuisent sans remor.

Dans ces conditions, les courants de marée du port et même les courants de chasse n'ont plus d'action suffisante pour maintenir les profondeurs. Des dragages annuels importants sont nécessaires. Les dragages atteignent l'entrée du port, déjà relativement étroite. En outre, ces jétées ne constituent pas de rade. Les jétées parallèles sont donc aujourd'hui abandonnées, sauf éventuellement pour les ports lagunaires ou les petits ports de pêche p. ex.

Dans les petits ports à jétée, on pratiquait anciennement des chasses de curage. A cet effet, on emmagasinait l'eau des hautes marées de V.E dans des bassins de chasse, séparés du chenal par des écluses de chasse (déversoirs à vanes)

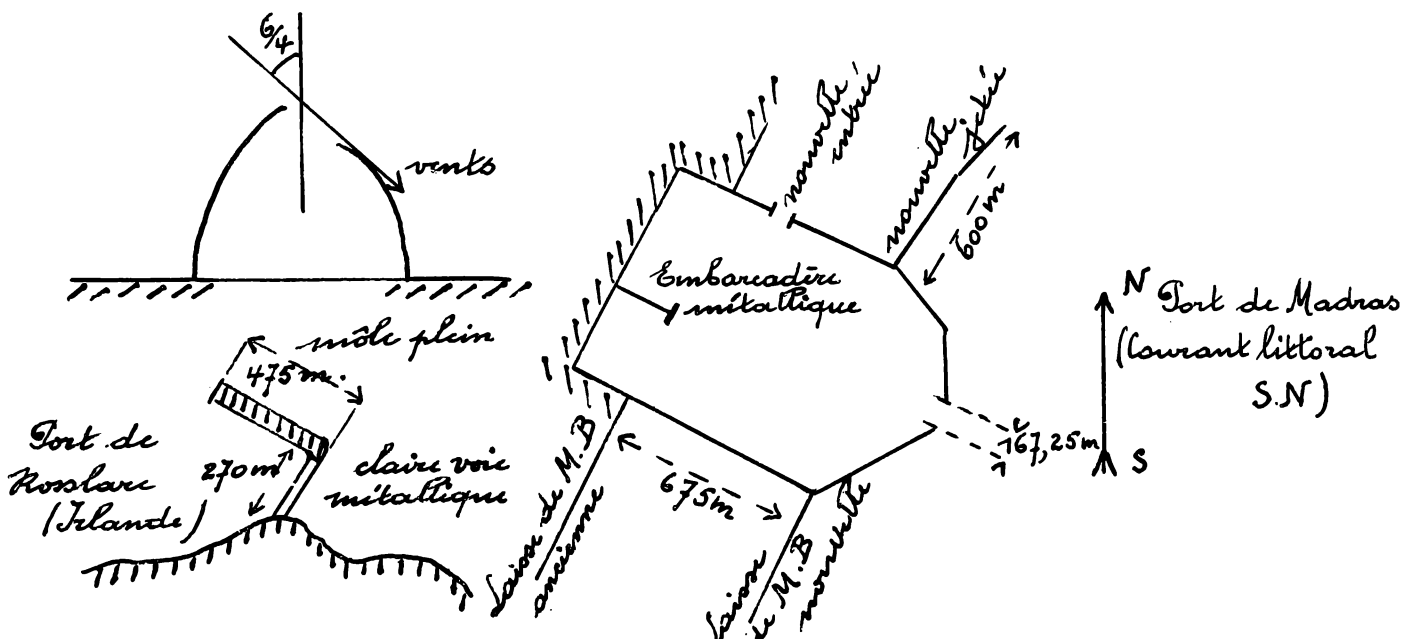
Lors des marées basses de V.E, on ouvrait les écluses qui envoyaient dans le chenal vers le large, un court et violent courant de curage. L'action curante ne suffisait toutefois que pour les faibles profondeurs et risquait d'affaiblir les ouvrages. Par suite des progrès mécaniques, le dragage a supplanté les chasses.

L'orientation des jetées parallèles se fait selon les principes exposés dans le paragraphe précédent autant que le permettent les circonstances locales; la jetée du côté des vents dominants est plus longue que l'autre, pour protéger l'entrée et la sortie des navires. Elles sont généralement quasi-rectilignes et légèrement obliques par rapport au rivage. Parfois on les établit suivant une courbe de grand rayon (> 800 ou 1000 m). La forme des môles ne supprime pas l'avancement des plages aux abords, mais peut le rendre moins défavorable pour l'entrée du port. En recourbant vers le rivage l'extrémité d'un môle oblique, on atténue la formation du haut fond derrière le môle, tandis qu'une fosse peut se produire en avant, près du coude. La forme la plus avantageuse est celle d'un môle courbe dès son origine. La plage avancée moins, le courant littoral progressivement dévié quitte l'extrémité du môle parallèle au rivage et ne donne presque aucun dépôt à cette extrémité.



S'il y a un courant d'abbe sensible en sens inverse du courant de flot, les effets du flot sont inversés et compensés dans une certaine mesure ceux des courants de flot, mais l'influence est généralement moindre, le courant étant moins fort et le charriage peut important. On conçoit néanmoins que l'idée soit venue de constituer l'entrée des ports par deux jetées convergentes, comme à Ymuiden. Le cas est intéressant parce qu'il a été couronné de succès et qu'il est important, car il ne s'agit pas seulement du port d'Ymuiden même, port de pêche, mais de l'accès au port d'Amsterdam, par le canal de l'Y. Le charriage se produit surtout avec le courant de flot (SN); il est légèrement compensé par le courant d'ébe (NS) et il est peu important. L'action du rissac de tempête a suffi pour empêcher les dépôts dans l'angle sud; la pente du fond est même devenue plus forte. Les deux jetées associées agissent comme un épi et un dépôt s'est formé au nord de l'entrée, de même qu'il y a tendance à formation d'une barrière dans l'entrée même, facile à maintenir. Il n'est plus avantageux de don-

mer aux jetées une forme à courbure continue, au lieu de la forme anguleuse et de prolonger légèrement la jetée du côté du vent. Néanmoins, la réalisation constitue un succès. Un tel dispositif réalise une entrée facile et constitue une vraie rade abritée, grâce à l'épanouissement, en arrière de la passe d'entrée. Cependant, à Madras (Indes) le système a complètement échoué, à cause des trop grands apports de sable, du sud vers le nord.



L'estran a avancé de 675 m. au Sud ; l'entrée du port à l'est a dû être formée ; une nouvelle jetée N.S. a été construite à l'abri de laquelle on a créé une nouvelle entrée à travers la jetée N primitive. Cependant les premiers navires avaient été viciés par des fonds de 14 m. Ceci montre combien l'importance du charriage littoral domine le problème.

Néanmoins les jetées convergentes constituent la solution. Lorsqu'un courant bien caractérisé domine, on peut songer à constituer une rade abritée derrière un môle courbe. Nous avons vu que c'est la forme la plus favorable et elle protège une assez vaste superficie. Lorsque le charriage est important, on établit l'origine du môle à claire voie, pour laisser passer les sables. Les navires peuvent accoster au môle en dehors de l'action du courant littoral. Le dispositif a donné de bons résultats au petit port de Rosslare en Irlande, un insuccès complet à Ceará au Brésil et ne semble pas avoir réussi à Zeebrugge selon toute attente. Des dragages modérés suffisent cependant pour maintenir les profondeurs. Près des côtes danoises, on a construit 3 petits ports-îles, établis en mer et reliés à la rive uniquement par stacade à claire voie. On pourrait songer à établir en mer une digue parallèle à la côte en dehors de l'influence du courant littoral. Cette solution n'a pas encore été tentée ; les liaisons avec le rivage devraient être à claire voie s'il y avait un charriage de sable et cette solution paraît

finalément impraticable. Elle pourrait par contre convenir pour une plage à galets.

7 Ports d'accostage en mer, appontements (wharfs) et môles.

Dans des cas spéciaux, les installations des ports se réduisent à des ouvrages isolés, établis en mer, en eau profonde, en des endroits aussi protégés que possible. Cette catégorie de ports se rattache d'ailleurs aux ports côtiers que nous venons de décrire, par les ports-îles et par les ports à môle couverte unique en eau profonde, tels que celui de Zeebrugge. Le môle porte en effet les voies, les engins de manutention et les hangars ou bâtiments nécessaires et les bateaux y accostent du côté intérieur. Le môle est large et protégé vers la mer par un parapet. Le dispositif avait pour but de faire de Zeebrugge un port de vitense et d'escale.

Nous avons vu les inconvénients des transbordements en rade. Lors que le trafic ne justifie pas l'établissement d'un port fermé, par exemple dans les colonies ou certains endroits d'escale, on établit des wharfs ou appontements en charpente de bois, d'acier ou de béton armé, poussés jusqu'aux profondeurs suffisantes pour permettre l'accostage des bateaux. Ces wharfs portent éventuellement une voie ferrée, des engins de manutention mobiles, etc.

Des ports particuliers et spéciaux, affectés par exemple au chargement du charbon, de minerai, de pétrole, etc. peuvent être établis en mer à proximité de gîtes ou de dépôts côtiers. Des ports d'amarrage fixes sont établis en mer, sous forme de dues d'Albe ou de plateformes en charpente et la liaison à la rive n'est établie que par transporteurs aériens, pneumatiques ou pipe-lines. Les supports des transporteurs doivent bien entendu être particulièrement robustes et fondés selon la technique des ouvrages maritimes.

Nous ne pouvons entreprendre une étude de détail de tels ouvrages, qui ne pourrait d'ailleurs consister qu'en une description de cas concrets, que l'on trouvera dans la littérature spéciale. Les principes de construction des éléments de ces installations ressortent à suffisance du cours.

Chapitre IV

Ouvrages extérieurs des ports.

1 Généralités. La morphologie et l'entretien de ces ouvrages sont influencés par les conditions spéciales résultant de leur emplacement et de leur fonction, à savoir :

les actions chimiques de l'eau de mer sur les matériaux;	les actions mécaniques de la mer sur les ouvrages;
	les sujétions de marée;

les grandes profondeurs au pied des ouvrages.

2. Action de l'eau marine sur les matériaux -

Par suite de sa composition saline, l'eau marine attaque un grand nombre de matériaux. Le fer, le zinc et l'aluminium sont attaqués, non seulement par l'eau, mais par l'air marin. On les protège par le coaltar, la peinture, ou mieux par zingage. Le fer et l'aluminium se rouillent vite, au contact du bois de chêne, à cause de la formation de galvane de fer, qui attaque le métal et le bois. Il faut éviter le contact avec le cuivre et le bronze, développant des actions électrolytiques. Le zinc n'est pas dangereux; il est électro-négatif par rapport au fer et le protège. Le cuivre, le bronze et le plomb ne sont guère attaqués, le zinc, lentement, ainsi que l'aluminium. Les ouvrages zingués ne doivent pas être peints au minimum de plomb, mais au minimum de fer, ou à l'oxyde de zinc.

Les constructions métalliques des ports maritimes doivent être faites en pièces de forte épaisseur, de surface minimum et facilement accessibles pour l'entretien des peintures.

Le bois est assez facilement atteint de la pourriture sèche dans l'air marin. Il faut le protéger par la peinture et recouvrir les abords des pièces verticales d'un chapeau ou enduit imperméable. Le bois constamment immergé se conserve indéfiniment s'il n'est pas attaqué par les organismes dont il est question ci-après. Les parties alternativement immergées et émergées sont facilement atteintes de pourriture humides. Les bois s'altèrent donc surtout au-dessus du niveau de M. B et sur la hauteur de l'amplitude de marée. Mais ils peuvent être attaqués par les xylophages: termites dans les pays chauds, la pelouze, ver blanc qui dévore la surface des pièces de bois et surtout le tarit (*Teredo navalis*), mollusque ayant la forme d'un ver grisâtre, de 0,02 de diamètre, pouvant atteindre jusqu'à 0,30 de longueur. Les tarits râtent le bois avec leur coquille et forment des galeries dans le sens des fibres.

Les xylophages ne se trouvent ni dans l'eau douce, ni dans les eaux saumâtres (marines diluées d'eau douce) ni dans les eaux vaseuses. On les trouve surtout dans des eaux de mer propres, assez chaudes, au-dessous des basses mers et par des fonds assez profonds et à fort courant. Certains endroits peuvent en être infestés et d'une manière variable avec la salure de l'eau (San Francisco, voir Engineering, 22 Juin 1928). Les bois fortement attaqués doivent être retirés, sinon ils constituent une cause d'infection. Les remèdes employés sont le mailletage (revêtement de clous jointifs, à larges têtes, ouvrages provisoires), le créosotage à 300 kg^{m²} par m² (procédé efficace) et le revêtement de mortier au ciment-gun ou coulé dans une gaine en poterie ou béton armé. On peut toutefois se demander s'il ne vaut pas mieux, dans ces conditions, substituer le béton armé au bois.

Certaines essences sont peu sensibles aux attaques des xylophages ; le chêne est moins attaqué que les autres essences indigènes. Mais ce sont surtout les essences exotiques qui sont le moins attaquées : les eucalyptus (Jarrah, Karri), le ketch et le greenheart. Ce sont des bois lourds, sauf le ketch, durs, difficiles à travailler, très résistants. On les trouve en forts équarrissages, et grandes longueurs. Leur marché est surtout dans les Pays-Bas, et en Angleterre. Les bois sont très recherchés pour les ouvrages maritimes, mais sont très coûteux.

Les pierres tendres, marneuses et argileuses, s'effritent à la mer. Les calcaires tendres, certains grès sont attaqués par des animaux lithophages. Les pierres feldspathiques peuvent s'altérer. On emploiera de préférence des pierres très dures et lourdes : porphyres, basaltes, quartzites, granites, calcaires très durs, etc.

On sait (voir cours de Chimie des matériaux techniques) que certains liants hydrauliques sont attaqués par l'eau de mer, jusqu'à perdre toute résistance. L'action de la marée favorise l'altération, aussi les altérations sont-elles beaucoup moins fréquentes dans la Méditerranée par exemple que dans l'Atlantique. Comme précautions, tant pour les mortiers que pour les bétons, il faut :

1° n'employer que des liants ayant été soumis à des essais sévères de longue durée et dont la fabrication uniforme est contrôlée et garantie. Le danger d'altération est d'autant moindre que le degré d'hydraulicité est plus grand ; il est donc préférable d'employer des ciments Portland plutôt que de la chaux hydraulique. Le ciment fondu résiste en général très bien à l'eau de mer ; toutefois, il exige certaines précautions pour éviter une altération dont la cause est sans doute complexe, mais qui est favorisée par un excès d'eau et une température élevée. Les ciments de laitier, de composition uniforme et garantie, peuvent convenir.

2° additionner au liant des matières pouzzolaniques : trass d'Oudermack, laitier granulé. Les matières doivent être finement broyées avec le liant, auquel on les substitue dans la proportion de $\frac{1}{3}$ environ.

3° employer des mélanges très compacts et riches. Il faut donc une bonne composition granulométrique de l'agrégat et un fort dosage de ciment ou de ciment et trass (1:1,5:3 en vol. abs. par exemple pour les pièces immergées en béton armé) Pour des travaux importants, on effectuera des essais préalables.

4° gâcher autant que possible à l'eau douce, plastique et pas trop mouillée ; assurer un bon dosage et un bon enrobage des armatures (5 à 10 cm). Les moules métalliques donnent une surface très lisse et peu poreuse. Le dosage vibratoire est recommandable.

5° éviter autant que possible le bétonnage à la marée, qui

produit des dilavages du béton, le rend poreux et prépare l'attaque ultérieure. On bétonnera donc de préférence dans des enceintes à sec (ouvrages intérieurs) ou, si ce n'est pas possible, en pleine mer, on emploiera des éléments moulés d'avance sur la rive : blocs, pièces en béton armé moulés d'avance, à assemblages préparés, que l'on assemble par des points utilisant du béton à durcissement rapide et des armatures, etc., et que l'on protège éventuellement par des gaines.

Par suite des progrès réalisés dans la fabrication des ciments, et la confection des mortiers et bétons, le béton et le béton armé tendent à devenir les matériaux universels pour les constructions maritimes comme pour les constructions terrestres.

3 Action mécanique des vagues. Nous avons vu dans l'appendice du cours d'hydraulique fluviale, que les mouvements ondulatoires de la surface des mers mettent en jeu des énergies considérables. L'énergie par m. d'une houle d'amplitude $2h$ et de célérité W est

$$\bar{\omega} h^2 \frac{\pi W^2}{g} \text{ kgm.}$$

Lette énergie a son siège

principalement en surface et s'atténue rapidement en profondeur, lorsque celle-ci est assez grande. La diminution est moins rapide pour les hauts-fonds, mais l'énergie des lames est alors moindre. Supposons que la lame dissipe toute son énergie sur un obstacle inébranlable pendant la période $\frac{2l}{W}$. Si P est l'effort moyen pendant ce temps,

$$E = P W \frac{2l}{W}. \text{ D'où } P = \frac{\bar{\omega}}{g} \pi h^2 \frac{W^2}{2l}.$$

P est maximum pour $2l = 2\pi h$, d'où $P = \frac{\bar{\omega}}{2g} h W^2$ et on peut admettre que la valeur instantanée maximum de P est double.

$$P_{\text{max.}} = \frac{\bar{\omega}}{g} h W^2.$$

Si on admet que la force est répartie sur l'amplitude $2h$ de la lame, en variant de zéro à un maximum, on trouve, comme pression superficielle maximum :

$$p_{\text{max.}} = \frac{\bar{\omega}}{g} W^2 = 0,105 W^2 \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

pour l'eau marine et $0,102 W^2$ pour l'eau douce, W étant exprimé en m/sec. Les formules correspondent assez bien avec les résultats d'observations dynamométriques faites en

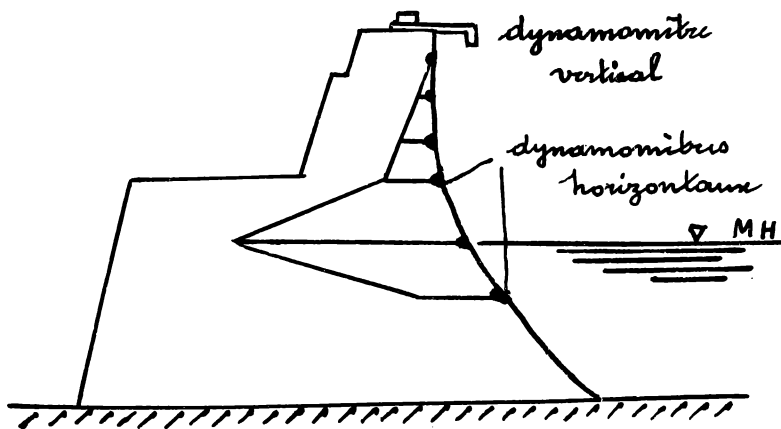


Diagramme des pressions des vagues relevé au môle de Dumbur par Stevenson

Angleterre et en Amérique par Stevenson et Baillaud. On a observé des pressions atteignant jusque 39 t/m^2 , mais qui sont toutefois exceptionnelles. Les observations de Stevenson sur le choc des vagues sur le môle de Dunbar (Firth of Forth) ont nettement établi que l'intensité est maximum au niveau moyen de l'eau et décroît rapidement en dessous et au dessus. Un dynamomètre disposé verticalement en surplomb sur la crête du môle a décelé des pressions verticales atteignant jusque $11,5 \text{ t/m}^2$, à 7 m. au-dessus du niveau moyen, alors que la pression horizontale n'atteignait que $0,137 \text{ t/m}^2$ au même endroit. La grande hauteur atteinte par les gerbes d'eau qui peuvent se produire lorsque les vagues se brisent violemment sur un mur (couramment 25 à 30 m. dans l'Atlantique, 50 m. à Eddyston, 60 m. à Cherbourg) ne permet donc pas d'apprécier la pression horizontale, par les formules $v = \sqrt{2gH}$ et $p = k S v^2$. Ces gerbes d'eau peuvent d'ailleurs provenir de lames de fond. Comme ce sont surtout les efforts horizontaux qui sont dangereux en superstructure, on conclut à l'utilité de formes courbes de parements, favorisant le défillement et l'action verticale des vagues. Selon les auteurs français, les chocs les plus violents ne paraissent pas devoir dépasser 15 à 20 t/m^2 sur les côtes accores de l'Atlantique et de l'Algérie, ainsi que dans le Golfe de Gascogne. Sur les fonds sous-marins en pente douce, et relativement peu profonds, 8 à 10 t/m^2 semblent des maxima, et 4 à 6 t/m^2 des valeurs moyennes et suffisantes déjà pour expliquer les accidents survenus aux ouvrages. Au-dessous de 7 à 9 m. , au maximum 10 à 11 m. , les envasements ne sont plus remués, mais bien le gravier et le sable, qui peuvent être soulevés par des fonds de plus de 20 m.

Le choc des vagues produit des vibrations intenses dans les constructions; il faut tenir compte de ce fait dans leur conception et dans le choix des taux de travail, qui doivent être réduits. Il y a donc avantage à accrotir la masse des ouvrages et à les rendre monolithes le plus possible. Les éléments de charpente doivent être lourds, rigides et rigidement assemblés. Le point de vue est important pour le béton armé dont la résistance permanente de traction sous l'effet d'efforts rythmés est faible et ne dépasse guère 12 à 16 kcs . Les éléments faibles soumis à vibration se fissurent; l'eau atteint les armatures et les corrode. L'expansion de la rouille fait sauter le béton et l'ouvrage se mine. Il faut tenir compte de ce fait pour la conception des ouvrages évidés en béton armé, ayant la structure de charpentes.

4 Sujétions de travail à la mer

L'oscillation de marée est très gênante. Si c'est possible, on s'en affranchira par des batardeaux élevés jusqu'au dessus des H.M.V.E. Lorsque l'on emploie des caissons à l'air comprimé fixes, à hausses, celles-ci doivent dépasser le même niveau et la pression doit varier avec la marée dans la chambre de travail.

Les caissons clochés doivent être équilibrés, de manière à être insensibles aux fluctuations de marée (causes de lestage d'eau). Au dessus du niveau de B.M., on peut travailler à marée, c'est-à-dire pendant la basse mer, l'ouvrage étant submergé à marée haute. Le système est très défavorable pour l'exécution des maçonneries et n'est pas recommandable pour les grands ouvrages. L'emploi de ciment fondu ou de ciment à prise rapide peut éventuellement permettre le travail à marée, notamment pour de gros massifs.

Une autre objection considérable, surtout pour les travaux extérieurs, est celle des courants, coups de mer et tempêtes. Le nombre des journées effectives de travail par an peut être réduit dans une forte proportion (120 jours par an au môle du port de Bari: Engineering, 2 mars 1928) et les interruptions en mauvaise saison peuvent être de longue durée. Il faut des dispositions permettant d'abriter le matériel.

Le travail aux grandes profondeurs se fait de préférence par immersion ou échangement d'encochements, de plateformes de fascinaiges lestés, de blocs, puits, caissons foncés ou caissons à claire voie, remplis ultérieurement de pierres ou de béton.

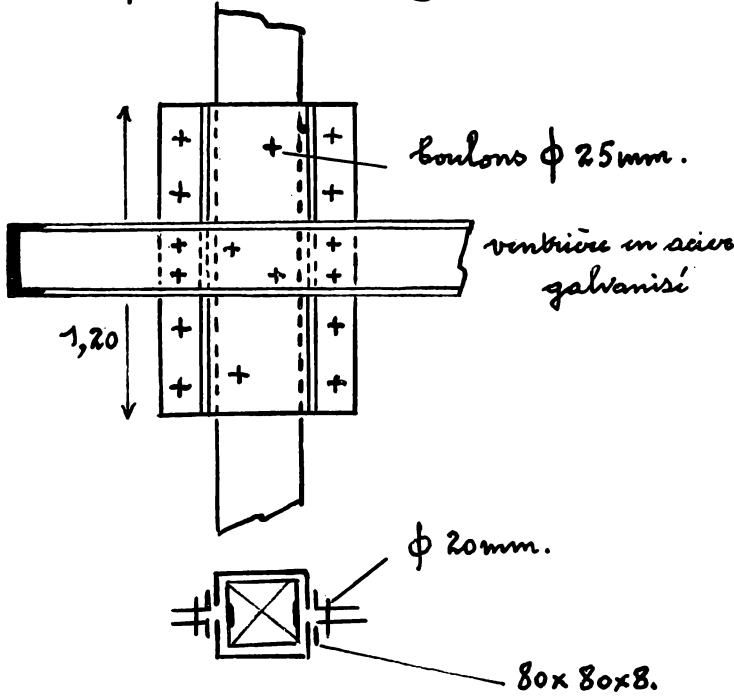
5 Jétées de chenauve.

Le sont les ouvrages parallèles délimitant les chenauves des anciens ports intérieurs en plages de sable. Les jétées séparent le chenal profond de la plage et des fonds exhausés par les apports venant se déposer contre la face extérieure des jétées, dont la majeure partie immerge à marée basse.

Pour ne pas troubler le régime de la plage, ces jétées sont souvent construites comme jétées basses, c'est-à-dire en faible saillie sur l'estran (Ostende). Leur forme supérieure est arrondie pour éviter le ressac; elles sont très analogues aux épis. On les établit sur massif de sable, de pierres ou de fascinaiges lestés, limités du côté du chenal et le plus souvent de l'autre côté également par des parois de palplanches jointives ou des parafoinilles. La partie supérieure reçoit un revêtement en moellons ou briques dures, posés sur champ en surface de 0,40 à 0,70 m. d'épaisseur totale. Le noyau, de sable ou de galets est divisé par des murs de refend. Les fascinaiges sont tunés. Sur l'estran, on épaulé la jétée par un ris borne de quelques mètres de longueur en moellons posés à sec, enrochements ou sacs de béton sur fascinaiges. Vers le chenal, on établit un perré régulier en maçonnerie de briques ou moellons, pierres sèches, sacs de béton, etc. appuyé au pied sur des fascinaiges ou des enrochements.

Pour permettre le halage et guider les bateaux, on établit, au-dessus des jétées basses des jétées hautes à claire voie, généralement en charpente de bois (Ostende) ou béton armé (Calais). Elles comportent des pallees contreventées de montants sur pilotis, distantes de 3,00 m. dont les traverses supérieures, servant de pièces de pont, supportent une planche

ou tôle, de 3 à 5 m. de largeur, établie à 3,00 m. de marée haute. L'extrémité, ou missoir, est généralement élargie : 5 à 18 m (Ostende : jetée-promenoir). Elle supporte généralement des simplores, feux, cabestans, etc. Les palées, en chêne ou greenheart, se composent de pièces de fort équarrissage : 30 à 40 cm. Les assemblages se font à mi-bois ou à entrecrois ; il faut prévoir les entailles : mortaises, tenons, qui déforment, et amorcent la pourriture. Les assemblages des montants sur les pieux sont consolidés à Ostende par des manchons de tôle Zinguée, en deux pièces et boulonnés. Les pilots sont verticaux ou peu inclinés ($\frac{1}{8}$ à $\frac{1}{10}$) et réunis par des ventrières en acier galvanisé sur la hauteur découverte par la marée, en chêne au-dessus de M.H. Pour éviter que les embarcations ne puissent être poussées entre les palées, on établit

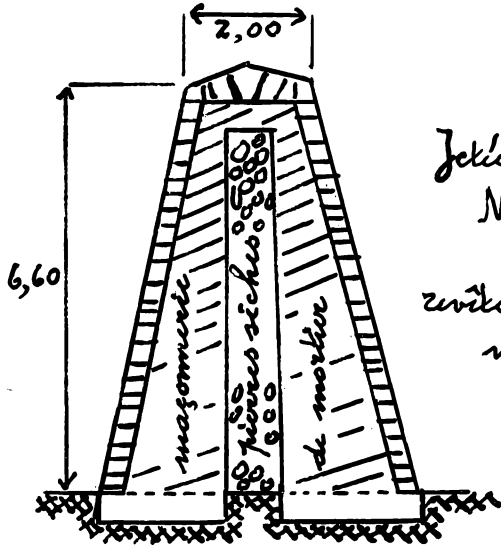


entre elles des poteaux de remplage distants de 0,70, 1,00 ou 1,50 m. selon les cas. Les assemblages à boulons doivent permettre des réparations faciles. Le plancher est en pitch-fine, le garde-corps en sapin. Il faut éviter toute forme saillante vers le chenal, qui pourrait blesser les bateaux. Les pièces exposées au frottement sont parfois recouvertes de fourrures de moindre équarrissage que les pièces à protéger et que l'on remplace après usure. Les jetées en bois sont coûteuses et incertaines, mais faciles à réparer. On tend à les remplacer par des jetées en béton armé, de structure sensiblement analogue, mais de réparation difficile en cas d'abordage.

Sous le niveau de marée basse, les jetées basses sont parfois prolongées au-delà des missoirs des jetées hautes. Dans ce cas, ou s'il n'y a pas de jetées hautes, elles sont repérées par des porches verticales portant des balises.

Les jetées basses et les claires voies ne protègent pas le chenal contre les lames. Si l'on doit assurer une protection, on établit des jetées pleines ou mi-pleines, encore parfois appelées jetées coffrées, du fait que les premières ont été réalisées en fixant des coffrages de madriers sur les palées des jetées hautes, et en remplissant l'intervalle d'enro-

chements. Actuellement, les jetées mi-pleines et pleines se construisent comme des murs verticaux en maçonnerie, ce qui permet de draguer à leur pied dans le chenal et y facilite la navigation au voisinage de la jetée (pas de risques de talonnement comme sur les talus). Les jetées mi-pleines sont surmontées d'une jetée haute en béton armé, comme à Calais. Les jetées pleines sont arasées à 3m. au-dessus de marée haute et portent un chemin bordé de parapets. Les jetées mi-pleines sont arasées à des niveaux compris entre HMME et BMME et généralement allant en s'abaissant de la rive vers le large.



Jetée pleine de Noirmontier

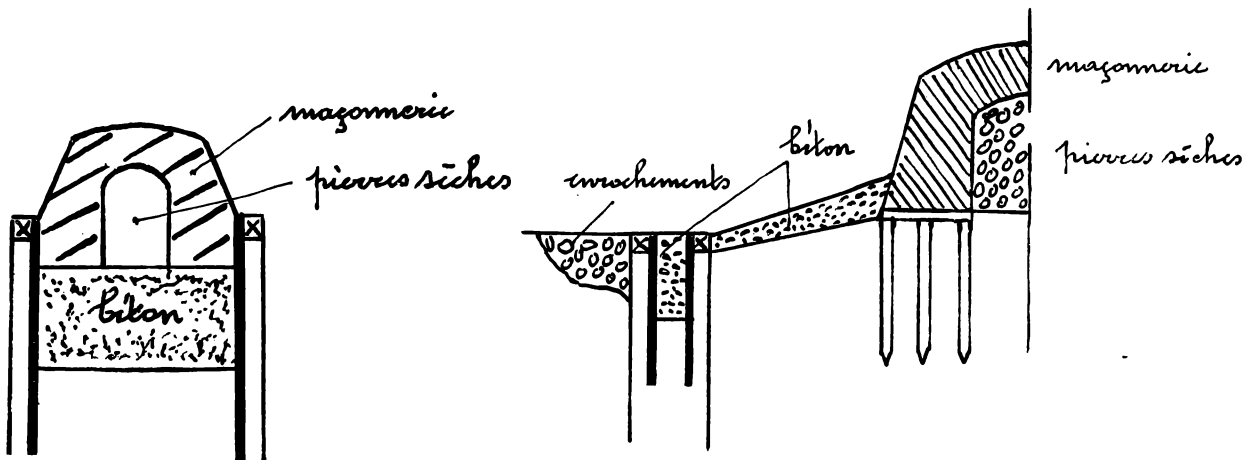
revêtement de moellons

de parapets. Les jetées mi-pleines sont arasées à des niveaux compris entre HMME et BMME et généralement allant en s'abaissant de la rive vers le large.

à Dunkerque et à Calais, ces jetées ont été construites comme murs verticaux avec parements du fût à fruit de $1/10$, fondés sur caissons perdus à air comprimé. La maçonnerie de briques ou béton est parementée en moellons. Actuellement, les caissons ou fûts en béton armé constitueraient une bonne solution.

selon les cas et notamment pour la partie construite sur l'estran découvert à marée basse, on peut employer un mur trapézoïdal creux construit sur noyau de pierres sèches ou un caisson en béton ou béton armé lesté de pierres sèches. On établit des refends maçonnés tous les 10 ou 15m. La fondation dépend du terrain. Directe sur le terrain rocheux, elle comporte une semelle en béton et des parafoinilles en plage de sable, des pieux de support ou des plateformes de fascinaiges en bois mauvais terrains, avec risbermes latérales en béton de 5 à 6m. de largeur, inclues entre parafoinilles. Les murs extérieurs, d'un fruit de $1/5$ à $1/8$ contiennent

selon les cas et notamment pour la partie construite sur l'estran découvert à marée basse, on peut employer un mur trapézoïdal creux construit sur noyau de pierres sèches ou un caisson en béton ou béton armé lesté de pierres sèches. On établit des refends maçonnés tous les 10 ou 15m. La fondation dépend du terrain. Directe sur le terrain rocheux, elle comporte une semelle en béton et des parafoinilles en plage de sable, des pieux de support ou des plateformes de fascinaiges en bois mauvais terrains, avec risbermes latérales en béton de 5 à 6m. de largeur, inclues entre parafoinilles. Les murs extérieurs, d'un fruit de $1/5$ à $1/8$ contiennent



ment des barbacanes, tandis que le dallage supérieur reçoit des ventouses; pour éviter des désordres par effets de succion des vagues. Les chambres d'épanouissement ménagées dans ces jetées ont des parois analogues à celles des jetées; le plafond reçoit un dallage en maçonnerie. Une claire voie à éléments espacés, pour ne pas créer d'obstacle aux lames, assure la continuité du promenoir au-dessus du brise-lames.

6 Jetées des estuaires - Nous avons vu dans le cours d'hydraulique fluviale que les estuaires sont souvent régularisés au moyen de digues prolongées en mer par des jetées formant rives sous-marines. Les jetées doivent être très résistantes aux courants et présenter donc une section considérable et des talus peu inclinés. Elles se rapprochent ainsi des digues côtières, sauf qu'elles ne doivent pas être étanches, et qu'elles peuvent être éventuellement submergées par les plus fortes marées. Elles sont en sable, gravier ou enrochements. La crête est généralement arrondie et dallée; la jetée est balisée. Sur bon terrain, assez peu profond et abrité, comme dans la Seine, les jetées sont de simples levées trapézoïdales d'enrochements revêtues de pierres. Aux grandes profondeurs, les parties hautes des jetées sont parfois formées de gros blocs arrimés ou de caisson en béton lottés, formant de grands monolithes résistants et supportés par un soulèvement à grand empattement (Rangoon) ou se rapproche alors des digues en eau profonde, décrites plus loin.

7 Digues et épis en eau profonde. Généralités -

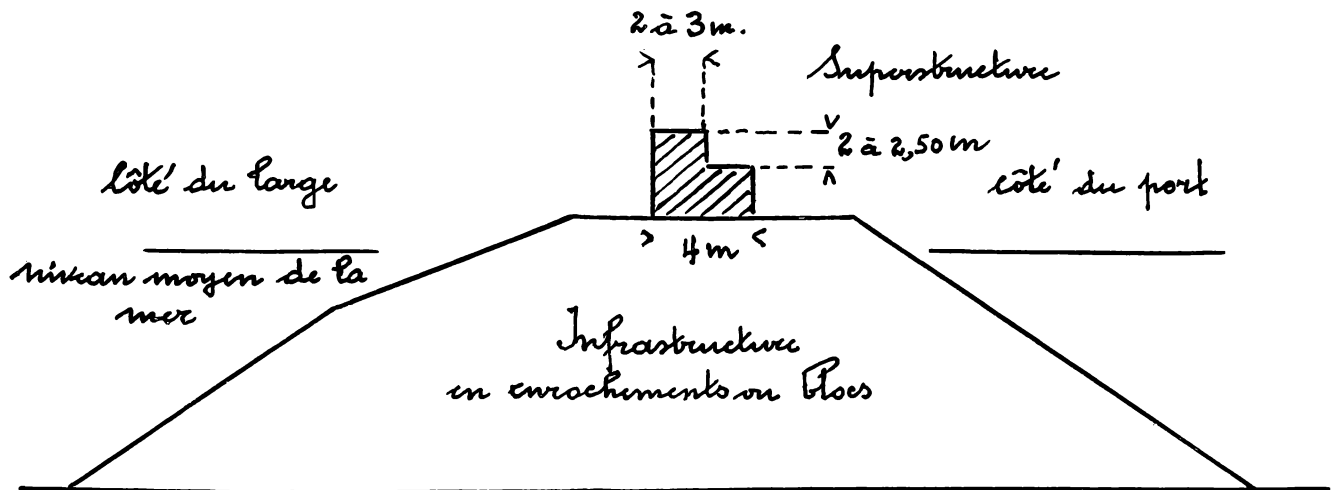
Ce sont les ouvrages les plus exposés; les Anglo-saxons les appellent breakwaters, c'est-à-dire brise-lames. Avec les phares en pleine mer, ils doivent résister aux effets maxima des plus violentes tempêtes et les dégâts à ces ouvrages sont fréquents. Comme leur rôle est essentiel à la sécurité d'un port, que leur construction et leur réparation sont difficiles, il importe de leur donner une solidité à toute épreuve. Mais le prix de ces ouvrages peut alors devenir très élevé et le problème se pose d'allier l'économie à la résistance et à la facilité d'exécution. Les circonstances particulières importent beaucoup, notamment l'amplitude de marée, la profondeur, la nécessité ou non de pouvoir accoster. Pour un même manœuvre minimum, la marée augmente beaucoup la hauteur de la digue et l'étendue de celle-ci exposée aux actions les plus violentes. La possibilité d'accoster exige un parement peu incliné et un empattement faible du côté de l'accostage. Il faut aussi considérer la violence et l'étendue d'action des vagues, la nature solide ou affouillable du fond, l'action du ressac et surtout du courants parallèles aux rivages (courants littoraux déviés) qui peuvent produire des affouillements profonds (Zebrugge)

Enfin, ces ouvrages absorbent des cubes de matériaux énormes;

Le système adopté dépendra donc aussi de la nature et de la quantité des matériaux dont on dispose.

En principe, les digues comportent une infrastructure (partie sous MB) en enrochements, fascines, perrés ou blocs non maçonnés et une superstructure (partie au dessus de MB) c'est-à-dire, sinon continue, du moins formée de massifs de dimensions considérables.

Digue dans une mer sans marée.



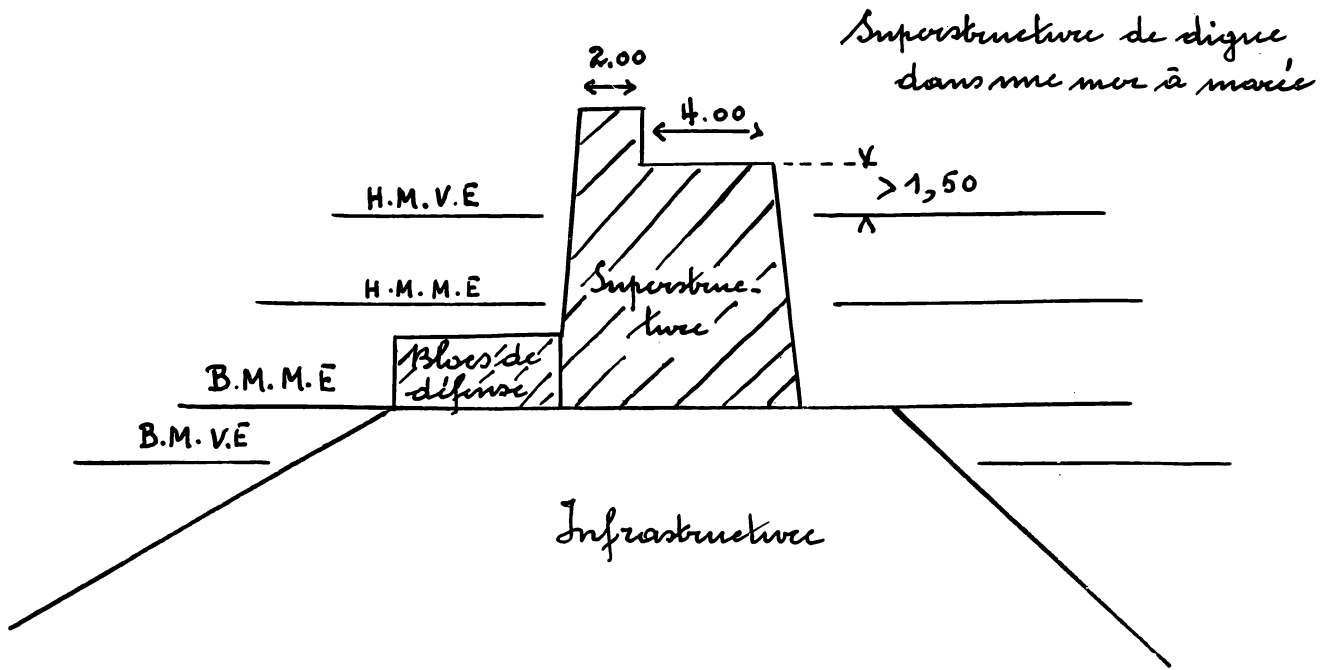
Le but de l'infrastructure, qui affecte la forme trapézoïdale à grand empiètement est d'assurer une grande surface d'assise sur terrain mou, de créer un talus produisant le débordement et réduisant le ressac, de permettre la construction par immersion aux grandes profondeurs (jusqu'à 54 m. à Valparaiso), d'éloigner les affouillements et d'atténuer leurs effets (éboulements superficiels des talus) et enfin de permettre des réparations aisées par rechargement des talus.

Le cube de ces infrastructures est énorme et elles sont facilement sujettes à dégâts.

La superstructure consiste en un mur de couronnement, continu ou formé de très gros blocs. Il a pour but de réduire le cube de l'ouvrage à la partie supérieure, de le couronner par un élément plus stable et résisttant au niveau des actions les plus violentes, enfin de réserver un chemin de circulation, portant éventuellement une voie forcée pour l'avancement ou l'entretien de l'ouvrage. L'importance de cette superstructure peut être faible dans les mers sans marées; les breakwaters américains en sont même généralement dépourvus, pour éviter le ressac. La digue est recouverte d'un revêtement superficiel de gros blocs plus ou moins arrimés. Le couronnement est établi jusqu'au-dessus de M.H.V.F.

Par contre, dans les mers à marée, l'infrastructure non maçonnée

serait généralement trop exposée entre MB et MH. La superstructure devient alors un mur à parements peu inclinés rignant depuis MBVE ou au moins MBME jusqu'au-dessus de MHVE, c'est-à-dire de hauteur assez considérable.



Dans ces conditions, lorsque la profondeur n'est pas trop grande et que le fond est solide, on substitue parfois une infrastructure maçonnée au massif de fondation non maçonné. Toute la digue a, depuis le terrain de fondation, le caractère d'un mur à parements peu inclinés. Le cube est beaucoup plus faible, la résistance est plus grande et les dégradations sont moins à craindre si l'ouvrage est bien construit, mais la gravité des dégâts et la difficulté de réparation peuvent être éventuellement plus grandes. Toutefois, très souvent, par suite de la grande profondeur, et de la nature affouillable du sol, il est nécessaire d'établir un massif d'assise en fascines ou enrochements, constituant une infrastructure partielle, non maçonnée, assise plus ou moins bas sous marée basse. C'est le type mixte, qui paraît généralement le plus judicieux dans beaucoup de cas.

8. Digues à infrastructure non maçonnée.

Le sous-bassement est formé d'enrochements, pierres ou blocs, immergés par déversement ou plus ou moins arrimés en surface et formant un massif en équilibre limité par des talus plutôt doux. Les blocs en surface sont exposés aux actions des vagues, principalement au niveau moyen de la mer, mais aussi au-dessus et en-dessous jusqu'à des profondeurs de 7 à 10 m.

En appelant l le côté d'un bloc cubique, Δ son poids spécifique, \bar{w} celui de l'eau, la stabilité du bloc est proportionnelle à $(\Delta - \bar{w})l^3$ s'il est immergé. L'action des vagues

est proportionnelle à l^2 ; donc l'équilibre des blocs dépend de $(\Delta - \bar{w})l$. Il y a donc intérêt à accroître les dimensions des blocs et à les arrimer de manière à présenter le minimum de prise aux vagues. D'après ceci, des blocs ayant même valeur de $(\Delta - \bar{w})l$ sont sensiblement équivalents, donc

$$\frac{l}{l'} = \frac{\Delta' - \bar{w}}{\Delta - \bar{w}}$$

Pour du granit ou du basalte, $\Delta = 2700$, pour du béton $\Delta = 2000 - 2100$. Donc

$$\frac{l_g}{l_b} = \frac{1700}{1000} \approx 1,7 \text{ à } 1,5 \text{ environ.}$$

Donc un bloc de béton équivalent à un bloc de granit doit avoir un volume en moyenne 4 fois plus grand et un poids dans l'air environ 3 fois plus grand.

Il serait donc désirable de pouvoir employer de gros blocs de pierre très dense. Mais ce desideratum est rarement réalisable; on ne dispose pas toujours de carrières convenables à proximité, les gros blocs sont coûteux et leur transport à grande distance est onéreux. On est donc pratiquement obligé de construire des blocs artificiels volumineux et pesants, soit en moellons maçonnés ou de préférence, à l'heure actuelle, en béton. Parfois on parementé avec les blocs en pierre dure. On pourrait en accroître la densité en y incorporant des déchets métalliques. Les carrières ordinaires fournissent des pierres dont la majeure partie a un poids variant de 3 à 100 kg (30%), un peu moins de blocs de 100 à 1500 kg. (25%) et à peu près la même quantité de blocs de 1500 à 4000, 5000 kg. et plus. Les blocs artificiels ont généralement de 10 à 40 m³ (20 à 80 tonnes). On en a employé récemment à Bari de 180 m³ (360 tonnes et de 450 tonnes à Alger) dans certains cas, assez exceptionnels toutefois, on a employé des blocs naturels de 10, 20 et même 30 tonnes (Cherbourg) et jusqu'à 50 et 75 tonnes (Gênes)

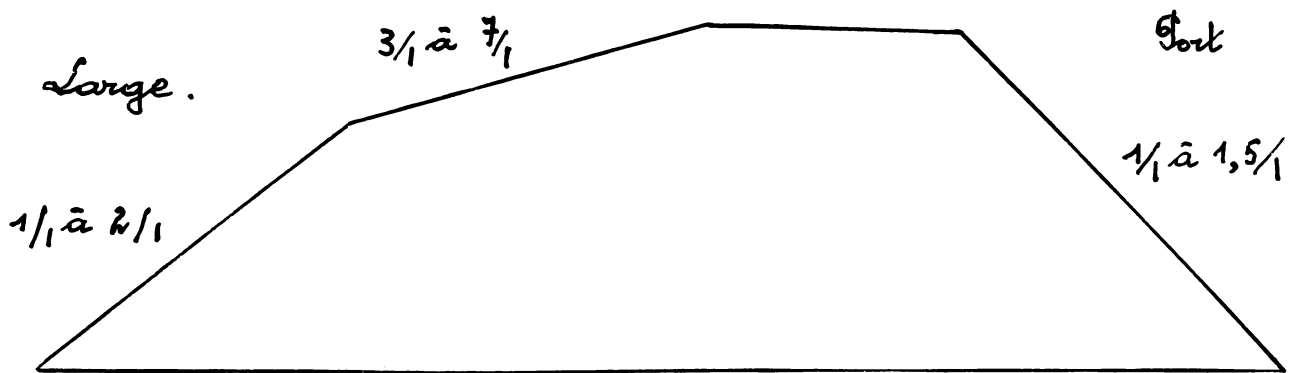
Le dosage des blocs artificiels est en moyenne 250 kg. de ciment, 400 l. de sable, 900 l. de cailloux dans l'Atlantique, 450 l. de mortier de chaux et pouzzolane, 800 l. de pierres dans la Méditerranée (Bari)

L'emploi d'enrochement tout venant peut présenter l'avantage d'une moindre maintenance, d'un moindre vide et donc d'un moindre tassement mais la résistance aux vagues est trop faible, et il faut nécessairement un revêtement épais en blocs lourds et plus ou moins arrimés. C'est le type ordinaire des breakwaters américains, dont le noyau est en tout venant.

On peut aussi former de la sorte le soubassement de digues très profondes. A Valparaiso, sous la cote - 20, le soubassement est formé de sables et déchets de carrière, recouverts d'une couche de 5 m. d'enrochements de petites dimensions (gros déchets de carrière)

Généralement, on constitue les digues d'enrochements classés en

tenant compte des profondeurs critiques à partir desquelles elles résistent d'une manière stable à l'action des vagues cette profondeur est plus grande vers l'extérieure que vers l'intérieure. Pratiquement, on constituera donc le corps de la digue de couches horizontales successives d'encrochements classés, dont les surfaces supérieures présentent des ressauts vers l'intérieure, favorables à la stabilité d'ensemble. Les couches successives tassent au fur et à mesure de l'exécution et réduisent le tassement ultérieure, qui affecte la superstructure. En outre, les matériaux sont exposés au moindre risque de déplacement en cours d'exécution. Cependant, le plus souvent, en regard au mode d'exécution, les encrochements et blocs de divers calibres ne sont pas établis par couches horizontales, mais surtout par couches inclinées; les blocs les plus gros étant vers le haut et vers l'extérieure. L'ensemble présente un talus extérieure de $1/1$ à $2/1$ jusqu'à 5 ou 10 m. sous le niveau moyen, suivi d'un glacis en pente douce de $3/1$ à $7/1$, portant la superstructure. Le talus intérieure est de $1/1$ à $1,5/1$ sur toute la hauteur.



Dans les mers sans marée, l'infrastructure étant arasée au niveau moyen de la mer, la superstructure est formée d'un massif de maçonnerie de plus de 5 m. de largeur, portant un chemin arasé à 2,50 m ou 3 m. au moins au-dessus de la mer. Vers le large, il est protégé par un parapet de 2 à 3 m. de largeur et de hauteur. Le mur se termine généralement par un feu. Tant pour éviter les effets du tassement que du retrait, on brangonne la superstructure par des joints distants de 6 à 10 m. Le parement vers le large doit être disposé de manière à éviter le ressac. On lui donne un léger fruit ou une légère concavité et on le raccorde convenablement avec le glacis, soit par un petit massif de butée indépendant en maçonnerie, appuyé sur le revêtement extérieure en gros blocs, armés ou non, soit par un ou des blocs spéciaux de protection, posés au pied du mur sur une berge assez large (10 à 12 m.) La couche supérieure de gros blocs couvrant le glacis, doit prendre appui aussi, à profondeur suffisante, sur une large berge du soulèvement

(12 m. au moins : Oran, Casablanca). Dans certains cas, on a constitué la superstructure partiellement ou totalement de blocs très volumineux et bien arrimés, protégé vers le large comme le mur monolithique et recouvert ou non par une semelle en béton ou en béton armé (Jetée de l'Alger à Alger, Brise-lames d'Alexandrie, jetées de Casablanca et de Bari, etc.) A vrai dire, on se rapproche ainsi fortement, comme apparence, des digues mixtes (Bari)

Dans les mers à marée, le soubassement est généralement moins élevé et la superstructure plus haute. Celle-ci prend l'aspect d'un mur de fortes dimensions, arasé à 2 ou 3 m. au-dessus de M.HVE et pourvu d'un parapet. Il est assis sur une semelle ou de gros blocs arrimés et protégé vers le large par des blocs spéciaux et le talus revêtu de gros blocs descendant généralement jusque sur le fond. Il faut particulièrement craindre les tassements qui peuvent désorganiser la superstructure; il faut notamment laisser reposer l'infrastructure pendant au moins une mauvaise saison avant d'entamer la superstructure.

Le type de digue à infrastructure non maçonnée est le plus employé jusqu'à présent. On lui reproche son volume considérable. Nous avons vu qu'on cherche à y remédier par l'arrimage des blocs (Môle Galliera à Gênes) pour raidir le talus supérieur, et par l'emploi de blocs volumineux empilés verticalement en superstructure. Le premier système a donné des mécomptes, les blocs étant peu chargés et exposés à suivre les éboullements du massif sous-jacent. Dans ces conditions, tout l'arrimage des blocs peut descendre par manque d'appui. Les blocs volumineux verticaux en superstructure ont donné de bons résultats, mais se rapprochent à vrai dire du type mixte.

L'exécution se fait par immersion, soit de la digue même, dans le sens de l'avancement, par voie forcée et dragons, grues, titans ou derricks (Alexandrie, Casablanca, Djedjelli). Le plus souvent, on emploie des chalands à clapets ou basculants pour les enrachements, à basculement ou à plateforme de lancement (plan incliné à rouleaux) pour les gros blocs. Les blocs arrimés ou posés sont mis en place par des pontons flottants à grues, derricks, titans ou ponts-roulants (Casablanca, Barcelone, Bari). Pour le bardage des gros blocs, on y réserve des trous ou rainures, pour le passage de chaînes ou tiges à crochets ou grappins (Voir Engineering, 2 mars 1928)

La grue flottante de 400 t. du port de Bari est du type à porte-à-faux; il en résulte un plan de flottaison et une bande variable du ponton; l'orientation exacte du bloc exige le mouvement de tout le ponton. Pour les blocs de 450 t. à Alger (Génie civil du 29 septembre 1928) on a employé un portique sur deux pontons; le bloc est suspendu à un châssis tournant portant deux chariots. L'orientation et la manoeuvre se font donc sans déplacement des pontons.

9 Digués à infrastructure maçonnée, à parois verticales -

Le type de mur se rencontre surtout dans les mers à marée, aux profondeurs modérées et sur un fond solide; il est en faveur en Angleterre et le progrès de l'outillage, dont la puissance développe beaucoup les moyens de construction, augmente la faveur de ce type, qui retient de plus en plus l'attention, surtout en association avec le précédent (type mixte)

La digue affecte la forme d'un mur continu à parements verticaux. Il est très massif et, s'il est maçonné, les sections sont de grandes dimensions et très lourdes. L'ouvrage est donc très résistant, d'autant plus que les lames ne déforment pas, mais par la formation d'ondes clapoteuses, donnent lieu à des pressions rythmées. Toutefois, ces pressions sont très fortes, l'amplitude et l'énergie des ondes clapoteuses étant grandes. Cependant les dangers principaux auxquels sont exposés ces murs sont les affouillements par l'action du ressac et surtout des courants rapides parallèles à l'ouvrage. Ce sont ces derniers qui ont miné une partie de la jetée de la Tyne en 1897 et produit des affouillements de 20m. de profondeur dans l'argile au pied du môle de Zebruggé directement assis sur le terrain. On ne peut donc les employer que sur terrain rocheux et on les protège parfois vers le large par une risberme ou un massif en blocs de béton (Ymuiden) On peut construire l'infrastructure en blocs de béton, empilés et armés sous M.B. par des scaphandriers et cloches à plongeurs. La liaison est assurée par des sacs de mortier ou de béton ou de béton coulé entre les blocs disposés vers les parements et formant coffrage (Douvre, Folkestone) On peut aussi employer des sacs de béton, surtout avantageux sur les fonds très irréguliers et les galés, au moins pour les premières assises. A Newhaven, les sacs remplis pesaient 100 tonnes, à La Ganira, 160t. Le procédé des sacs de béton dû à William Dyce-Lay peut être avantageux dans certains cas. Il emploie des sacs de jute, incomplètement remplis, de manière à bien se manœuvrer les uns aux autres. Il faut opérer avec soin et rapidement pour éviter des déchirures et des dilavages et assurer une bonne soudure des sacs, avant qu'ils n'aient fait prise. Néanmoins, des joints sont presque inévitables.

A Wicklow, Newhaven etc, on a construit des monolithes de béton coulés sous eau entre coffrages, éventuellement sur fondation en sacs pour créer une assise horizontale. On peut construire l'infrastructure monolithique à l'air comprimé, par caissons mobiles (St. Nazaire) ou caisson perdu en béton armé que l'on échoue en place par le stage de béton (Zebruggé, Barcelone, Savone, etc.)

En Amérique et en Russie, dans les grands lacs, les mers intérieures et la Baltique, où les tempêtes sont moins violentes et les bois abondants, on emploie des digues mixtes en bois, enrochements et maçonnées.

En Amérique, on emploie des crib-works, formés de pièces

de bois entrelacés, ou des caisses, les vides étant remplis d'enrochements.

Les socles, établis éventuellement sur une couche d'enrochements et protégés éventuellement vers le large par une berge ou un massif d'enrochements, peuvent recevoir une superstructure maçonnée.

Dans la Baltique, on remplit d'enrochements et de gravier l'espace compris entre deux files de pieux jointifs peu inclinés. Le noyau est en tout venant pour réduire la perméabilité. La superstructure est maçonnée. En cas de besoin, les files de pieux sont doublées.

10 Type mixte - Le plus souvent, il est utile de donner aux murs monolithes une fondation souple en fascines ou embranchements, pour écarter les affouillements et réduire le ressac. A Zebrügge, où l'on avait tout d'abord échoué les caissons sur le fond argileux, les affouillements ont obligé à établir un soulèvement en enrochements. On réalise ainsi le type mixte, qui convient surtout pour les murs à marée, mais aussi pour tous les ouvrages profonds et très exposés.

Le point capital est de donner une bonne assise au mur et d'éviter ses dislocations ultérieures. Le massif d'enrochements doit donc être arasé à profondeur suffisante (8 à 14 m. sous les hautes mers ordinaires). Il faut une berge assez étendue au pied du mur de part et d'autre, portant des blocs de protection du côté du large. Le mur doit être massif et bien stable (épaisseur à la base sensiblement égale à la profondeur). Il doit être tronçonné en éléments pas trop longs (< 20 à 25 m.) et construit après tassement du soulèvement, pour éviter les ruptures ultérieures. Les blocs coulés dans des caissons métalliques à Zebrügge mesuraient en moyenne 25 m. de long et 9 m. de large. La hauteur variait de 6 à 9 m. (Poids: 2500 à 3000 tonnes après testage) comme épaisseur, c'est un minimum; il est recommanda. de ne ne guère descendre en dessous de 10 m. (En fait, la largeur variait à Zebrügge de 8 à 11,50 m.) On peut construire le mur en blocs de béton empilés et plus ou moins liés. (antemurale de Naples). Les dimensions de ces blocs sont allées croissant, jusqu'à 10 x 5 x 3,60 à Bari (360 tonnes)

Pour augmenter la mobilité de l'avancement en vue des tassements, on a eu l'idée d'empiler les blocs en feuilletés inclinés sur la verticale, de 22° à Colombo et de 19° à Scherwinighe. En cas de tassement, ces feuilletés glissent les uns sur les autres et la désorganisation se limite au revêtement monolithique éventuel. Il semble toutefois que cette méthode doive céder le pas à celle des blocs empilés verticalement et de grandes dimensions: les blocs résistent surtout par leur poids et le frottement qu'il engendre. Comme valeur sûre du coefficient de glissement, tenant compte de la présence d'eau dans les joints, on peut envisager 0,60. Un minimum de 0,54 a été observé par essai direct à Antofagasta (Chilidémie civil du 24-11-28. Au niveau moyen, où les actions sont les plus violentes, il peut être bon de briser les joints horizontaux, de manière à intervenir la résistance aux cisaillement à la stabilité au glissement.

Pour la confection de ceux-ci, les caissons métalliques ou de préférence en béton armé, de grandes dimensions, ont donné de bons résultats et semblent les plus favorables. Les caissons ont la structure ordinaire et sont divisés par des parois de refend résistantes. On les teste autant que possible avant de les amener en place, ou on les échoue rapidement en laissant pénétrer l'eau dans quelques-uns des compartiments (2 sur 4 à Bizerte). On remplit alors de béton à sec les autres compartiments, puis on épuise les premiers, que l'on bétonne à leur tour. A Zeebrugge, tout le caisson était noyé, les parois immergées d'un mètre à M.B. Le bétonnage s'est fait sous eau par bennes de 5 m³. A Zeebrugge, tout le caisson métallique était abandonné. A Bizerte, le caisson n'avait que deux mètres de hauteur, dont un pour les poutres du plafond. Il était surmonté de hausses mobiles récupérables. Les cloisons étaient renforcées par de la maçonnerie, réservant quatre grands puits et quatre petits et constituant un premier étage. Les petits puits servent au pompage et à la manœuvre des vannes. Actuellement, on préfère des carcasses en béton, qui ne doivent être que légèrement armées : Barcelone, Valparaiso.

Citons une méthode dérivée de celle des puits ou blocs creux de fondation. Elle consiste à empiler des blocs cellulaires, posés au moyen de devices flottants et dont les vides sont ensuite remplis de béton coulé sous eau (Sourone, Gênes, Naples)

Les digues mixtes ont donné de bons résultats en général. Les accidents arrivés à certaines d'entre elles ont des raisons communes.

Livita - Nicchia : massif d'encrochements arasé trop haut.

Bizerte : construction trop rapide ayant entraîné un tassement insuffisant des encrochements ; risbermes trop étroites et talus trop raide vers le large. Barcelone : fondation trop haute ; muraille monolithique trop étroite et insuffisamment protégée au pied vers le large.

11 Digues à terre-pleins - Il arrive que les digues ou môles limitent du côté du large des terre-pleins, qui peuvent avoir été partiellement conquis sur la mer ou un estuaire ou remblayés à l'abri du môle.

La construction vers le large est conforme au paragraphes précédents, généralement du type mixte ou à infrastructure maçonnée. Vers le terre-plein, la construction peut être éventuellement simplifiée si le remblai est fait immédiatement, ce qui épaulé la superstructure contre les coups de mer. A Zeebrugge, la largeur des caissons extérieurs a été réduite à 7,50 m. (mur abri) en bordure du terre-plein de 76 m. de largeur, limité vers l'avant-port par un mur de quai sur encrochements construit en eau calme. A la nouvelle digue Ouest du Havre, le mur a reçu un profil de mur de quai massif, établi selon la profondeur sur massif d'encrochements protégé vers le large.

Le terre-plein doit être arasé à 8 ou 9 m. au-dessus des plus hautes mers et on conserve éventuellement le parapet protecteur vers le large. Le mur intérieur doit avoir au pied des profondeurs suffisantes pour l'accostage.

Chapitre V.

Ouvrages intérieurs des ports.

1 Généralités. Les difficultés d'exécution de ces ouvrages sont moindres que celles des ouvrages extérieurs et dominant moins leur conception. Les contraintes aussi sont moindres, bien qu'il faille encore tenir compte de l'action de la houle, quoique atténuée. Mais les ouvrages ne sont plus exposés aux vagues de tempête. Les effets de la salure et de la marée subsistent. Une difficulté considérable provient du fait que le terrain est souvent très déformable (vase) et que les ouvrages doivent cependant supporter des charges considérables : voies forcées, grues, hangars, etc. D'autre part, les profondeurs requises sont généralement grandes. Si on y a ajouté l'amplitude de marée, la revanche minimum du terre-plein (2 m. environ en bassin abrité) et la profondeur minimum de fondation, on obtient des hauteurs de construction de 20 à 30 m. La sujétion d'eau devient alors considérable. Le travail dans l'eau aux grandes profondeurs s'effectue le plus souvent par l'air comprimé, à moins que l'on ne puisse adopter une fondation haute sur pilotis pour les ouvrages qui n'ont pas de retenue d'eau.

Lorsque c'est possible, on établit les ouvrages en fouille dans le terrain ferme, séparé des bassins par une digue réservée en terre, d'épaisseur suffisante pour la sécurité de la fouille. L'épaisseur se fait, selon le terrain et la profondeur, par rigoles de drainages, puisards et pompes. Pour des ouvrages de dimensions modérées : têtes d'écluse, fouillis de murs, etc., on emploie le rabattement de la nappe aquifère par battée de tubes filtrants ou pompes de sondage. Seulement, les terrassements sont généralement importants. Lorsque il s'agit de construire un bassin, on les réduit au minimum en n'effectuant la fouille à sec qu'au-dessus du niveau de haute mer ordinaire, ainsi que le déblai nécessaire pour la construction des murs etc., que l'on peut d'ailleurs établir sur fondation haute. Lorsque le béton est bien durci, on perce la digue et on met le bassin à profondeur par dragage, les déblais étant refoulés au lieu de leur emploi (remblaiement de terrains bas, constitution de terre-pleins) - (voir Engineering, 11 mai 1928, extension du Royal Edward Dock à Avonmouth)

Pour les batardeaux de grande hauteur, l'emploi du béton armé coulé sous eau, selon certaines expériences scandinaves, ou mieux des pal-planches métalliques, a permis de faire de grands progrès.

Pour les ouvrages d'évacuation et les écluses de la digue de Linderzee, on a préféré établir les ouvrages en mer, dans des endroits abrités par le moyen de grands batardeaux formés, plutôt que de les associer en terrain vierge. On évite les fouilles importantes et le terrain de fondation n'est pas plus mauvais, surtout s'il y a quelque courant empêchant le

dépôt des vases (marée)

Le béton et le béton armé peuvent être employés presque sans réserve pour les ouvrages intérieurs des ports, presque toujours exécutés à sec. Ils ne sont mis en contact avec l'eau salée qu'après durcissement suffisant; néanmoins, il est utile de prendre les précautions requises pour la travaux à la mer, d'une manière raisonnable et adéquate aux circonstances.

2 Murs de quai - constituent les constructions, les ouvrages intérieurs les plus importants et les plus courants. Ils limitent les bassins profonds des terre-pleins. Leur parement doit être sensiblement vertical et sans saillies. Leur stabilité dépend de leur poids, des poussées des terres derrière les murs et de la poussée de l'eau, variable si le bassin est à marée. L'élément relatif à la poussée des terres est incertain, surtout si le niveau de l'eau est fluctuant. L'oscillation étant périodique, on peut estimer que le niveau de l'eau dans le terrain s'établira à la marée moyenne, pour autant qu'il n'y ait pas d'afflux d'eau souterraine. En principe, il ne faut donc pas drainer sous marée haute, ou drainer seulement par des moyens filtrants. Mais il est favorable de remblayer derrière le mur avec des terres perméables et poussant peu, sable gros, de préférence même gravier ou pierreaille. L'argile est dangereuse si elle peut se délayer ou gonfler. Certains ouvrages massifs modernes possèdent des épaisseurs qui ne peuvent suffire que pour des faibles poussées des terres; il serait impudent de s'en inspirer sans plus ample examen. Les poussées considérables que peuvent développer les terres argileuses sur les murs de quai ont été mises en évidence par les déversements et les glissements des murs de quai dans l'Escaut à Oovers. Les glissements ont été rendus possibles par la fondation plane et horizontale établie sur l'argile. Il faut évidemment vérifier la stabilité élastique et de glissement sur la base de fondation, dans les diverses hypothèses, de la même manière que pour les murs de soutènement.

En principe, les types employés pour les murs de soutènement peuvent convenir pour les murs de quai, surtout s'ils sont construits à sec à l'abri de batardeaux ou en fouille ouverte. Pour réduire la tenue d'eau, la semelle de fondation est parfois coulée sous eau dans un encoffrement de palplanches.

On donne généralement aux murs construits à sec la forme massive. On les fait en béton, à joints de retrait et parfois parementés depuis M.B. jusqu'au couronnement. On conserve une grande largeur au couronnement, ce qui stabilise, permet d'y établir une galerie pour les canalisations de toutes espèces utiles dans un quai de port, et permet d'y poser un ou même tous les rails des grues, des bollards d'amarrage, etc. Les murs très massifs sont cependant coûteux. Pour

réduire l'épaisseur sans nuire à la stabilité, on pourrait avec avantage, utiliser les ancrages ou mieux, les épérons équilibrants en béton armé, qui n'ont encore guère reçu d'application dans les murs de quai. On a construit des murs avec évidements à arcades à Copenhague.

Les murs massifs sont cependant actuellement en déclin ; le développement du béton armé favorise des structures plus ingénieuses, notamment les murs sur plateforme élevée fondée sur pieux, qui constituent une forme caractéristique des murs de quai. Son principe a déjà été exposé dans le cours de murs de soutènement et fondation. Ils conviennent pour les bassins à niveau sensiblement constant (bassins à flot) ; ils peuvent cependant être adaptés aux bassins à marée. Les types anciens (Fays-Bas) comportaient une large plateforme en charpente de bois (grib) établie sur pilotis verticaux et obliques. Sur cette plateforme, on élevait à l'avant un mur maçonné, derrière lequel on remblayait sur la plateforme. Sous la plateforme, les terres s'étendent suivant le talus naturel lors du remblayage ou du dragage au pied de l'ouvrage. Parfois, en mauvais terrain, on bat des palplanches le long du bord postérieur de la plateforme, pour retenir les terres en arrière. Le talus sous la plateforme est souvent recouvert d'engrèvements lors du remblai et, si le terrain est très mauvais, constitué éventuellement par un remblai préalable de gravier ou des plateformes de fascinages disposés en retrait et au travers desquelles on bat les pieux. En terrain très poussant, la plateforme est aussi parfois ancrée en arrière dans le terrain à des massifs, pesants.

Actuellement, on établit ces murs sur pieux en béton armé ; ils ont l'aspect d'une cornière à longue branche horizontale (semelle). On arme autant que de besoin. Dans certains types récents, le parement du mur est prolongé par des palplanches jointives en béton armé, solidarisiées avec le mur et qui retiennent les terres, dont la poussée est réduite par l'action de la longue semelle et la pression des pieux. Cette cloison sert notamment à protéger les pieux en bois de l'action des tarrets (Göteborg). La plateforme est établie peu sous le niveau ordinaire de l'eau, mais de manière à être toujours noyée, surtout si elle est en bois.

Les ouvrages peuvent donc se construire à sec avant creusement complet du bassin dans une fouille dont le fond n'est que peu sous H.M.O. S'il s'agit d'un mur à marée, il faut descendre la fouille du mur presque sous B.M.O ; néanmoins la sujétion d'eau est encore réduite.

Pour les quais devant supporter des manutentions non pondéreuses, le poids du remblai sur la plateforme est une nuisance. A Avonmouth (Angl. - neering, 11 mai 1928) pour les murs de quai des nouveaux docks, on a constitué le terre-plein en bordure d'une dalle nervurée en béton armé, reposant sur de fortes poutres transversales en forme de cadre à 3 pannes. Les poutres sont supportées par des pieux en béton armé ; elles réservent un espace creux fermé à l'avant par une paroi verticale et à l'arrière par une paroi

de retenue des terres. Le type, qui a l'apparence d'un mur, est à vrai dire un appontement perfectionné. Les murs sur plateforme surélevée peuvent aussi se construire dans l'eau; il faut alors établir un batardeau, mais la tenue d'eau est faible. Les palplanches permanentes d'avant sont utiles pour la construction de ce bateau. L'échange d'un caisson sur la tête des pieux récifs au niveau voulu est un procédé précieux et abandonné. D'une manière générale, les palplanches métalliques et en béton armé peuvent recevoir de nombreuses applications dans les ports pour l'établissement de quais légers ou provisoires. Leur résistance propre est accrue par des ancrages.

Les procédés employés pour construire les murs de quai dans l'eau sans épuisement ont été tous exposés dans le cours de fondations. L'emploi de l'air comprimé par les caissons métalliques à hausses ou les caissons cloche cède le pas aux caissons en béton armé (Dieppe, Espagne). Les caissons fonceés, en béton armé, échoués puis testés, deviennent très en faveur. Les caissons sont cloisonnés et divisés en un assez grand nombre de compartiments, ce qui augmente la solidité et permet, après échouage, d'épuiser les compartiments par petits groupes et de les tester de béton et de sable. Les caissons des bassins à marée émergent peu au-dessus de basse mer; le couronnement monolithique peut être construit à marée.

On emploie aussi des puits havis jointifs (voir cours de fondations) remplis après coup, ou des blocs armés, posés soigneusement sur une semelle de béton coulé sous eau, de sacs de béton, ou une plateforme d'enrochements. En Amérique et en Russie, on emploie des cribs comme infrastructures, jusque sous marée basse.

On établit aussi des infrastructures discontinues (voir cours de fondations) formées de piliers fondés sur caissons à l'air comprimé, caissons échoués, puits havis ou blocs armés. Entre ces piliers, on établit des voûtes ou des linteaux en pontelles métalliques enrobées de béton ou en béton armé. Tout mur couronne le mur vers le bassin au-dessus de H.M.E. Généralement la longueur des piliers est insuffisante pour que les terres s'établissent en talus naturel depuis le pied du mur jusqu'au linteau.

Il faut donc obturer la partie supérieure du vide pour un mur cor-nière en béton armé, ou un petit caisson échoué, ou des blocs armés, ou des palplanches, appuyés sur un massif d'enrochements immergé entre les piliers et en arrière, ou sur des pieux battus en lignes derrière les piliers et réunis par une plateforme. Le dispositif de support est en général arasé peu en dessous du niveau de M.B.

Les murs de quai portent des accessoires: échelles métalliques fixées dans des retraites, escaliers avec main-courante établis latéralement dans des chambrés (leur pente est $3/2$ environ, la montée opposée aux vents dominants) comme dispositifs d'amarrage, on établit des organesaux, surtout pour les petites embarcations dans les bassins à marée. Sur le couronnement, on établit

des bolards en fonte ou acier coulé, espacés de 25 à 30 m. Pour les petites embarcations, on établit des canons ou pieux de 10 à 12 m. Les bolards doivent être ancrés solidement dans le mur, ou dans des massifs en arrière des murs évidés ou surélevés. Les efforts exercés par les câbles des grands navires sur les bolards peuvent être très élevés ; il faut se préoccuper alors non seulement de la stabilité propre des massifs d'ancrage, mais aussi des poussées qui peuvent être reportées par les torres sur les murs. Par le moyen d'éperons et d'ancrages en béton armé, il n'est pas difficile de trouver, dans un cas concret, des dispositions favorables à la stabilité d'ensemble. Pour ménager les coques des navires, on fixe parfois sur le pavement des fourures verticales en bois.

3 Appontements, piers et wharfs - Les murs des quais sont très coûteux, et pour développer les installations, lorsque la nature du trafic le permet, on recourt éventuellement aux appontements. Ce sont des constructions à claire-voie comportant une plateforme établie sur des palées de pilotis ou sur des piliers. Elles portent les appareils de manutention et les organes d'amarrage, éventuellement des voies forcées et même des hangars. On peut les établir le long des berges ; ils précèdent alors des murs sur piliers et des murs surélevés. Nous avons indiqué, à propos du Bassin d'Avonmouth un dispositif de transition. Sous l'appontement, la berge s'étale en talus, généralement revêtus d'enrochements, d'un pavé sec ou maçonné, de dalles de béton ou de fascines, selon la nature du terrain.

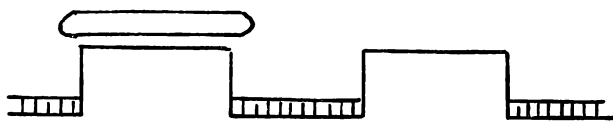
Les appontements, plus légers et moins résistants que les murs, ne conviennent pas aux marchandises pondéreuses, mais au trafic, généralement spécialisé, de certaines matières divisées, fluides ou légères ; grains, pétroles, poisson, viandes congelées, même des charbons et minerais en cas de manutention par transporteurs. Les charges verticales sont déterminées par les conditions d'exploitation. Les efforts horizontaux provenant de l'amarrage, des chocs et frottements des navires peuvent être évalués d'après les éléments locaux.

Les appontements en bois sont encore plus répandus, à cause de la facilité de construction et de réparation et de leur élasticité. L'emploi de pieux de fort équarrissage les rend résistants (30 à 40 cm) Les palées, écartés en moyenne de 2,00 m., peuvent être rapprochés de la résistance l'usage. Les inconvénients sont leur durabilité limitée, les frais d'entretien élevés et le danger d'incendie.

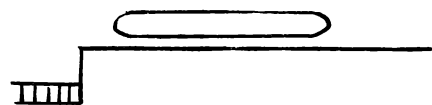
Les appontements en béton armé acquièrent de plus en plus de faveur, à cause de leur résistance, de leur inaltérabilité, et parce qu'ils s'associent favorablement avec les hangars en béton armé. Leur inconvénient principal est la rigidité, qui amplifie les dégâts aux navires et la difficulté de réparation de l'ouvrage en cas d'abordage. On protège éventuellement les appontements par des pieux en bois et des ventrières placés en avant. Ils contiennent des joints de dilatation, distants de 50 m. p. ex. Pour augmenter la résistance aux efforts horizontaux, on solidarise généralement l'appontement avec le torré-

plein en arrière, de manière à réaliser à la fois une entrée et un ancrage. On se rapproche ainsi finalement du type à mur de quai surélevé. Les appontements peuvent se construire à sec, avant mise en eau du bassin; ils sont alors moulés sur place. Lorsqu'ils doivent être construits en eau profonde, cas fréquent, l'emploi de pièces moulées d'avance est avantageux. Les assemblages se font au ciment prompt. Il s'agit surtout des pièces de contreventement des longs pilots, dont le rôle est essentiel pour la résistance. Pour augmenter la résistance horizontale, les Américains emploient aussi beaucoup des piliers formés de cylindres verticaux, que l'on descend sur ou autour d'un groupe de pieux battus et que l'on remplit ensuite de béton. Des ouvertures ménagées dans les cylindres permettent d'y fixer, avant le bétonnage, des pièces de contreventement moulées d'avance.

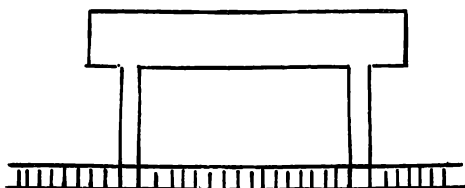
Les appontements de rive sont continus ou discontinus, selon le but. Pour une exploitation publique, l'appontement continu est supérieur. On peut aussi disposer les appontements perpendiculairement à la rive ou obliquement; ils délimitent alors de vrais petits bassins pour deux navires et peuvent recevoir deux navires (la longueur ne dépasse en général pas un poste d'amarrage). La disposition de voies forcées et de grues mobiles est difficile; ces appontements conviennent surtout pour la manutention par transporteurs mécaniques ou pneumatiques ou pipe-lines. Les dispositifs s'emploient aussi en rivière lorsque les profondeurs à la berge sont insuffisantes. On peut aussi établir dans ce cas des appontements parallèles à la rive, en eau profonde, reliés à la rive par des passerelles.



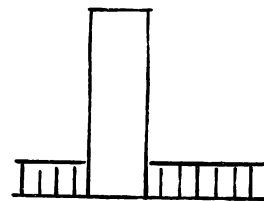
Appontements discontinus



Appontement continu



Appontement parallèle à la rive en eau profonde



Appontement perpendiculaire à la rive.

Les navires de mer ne peuvent accoster que sur une face et les communications avec la rive sont plus défavorables qu'avec les appointements normaux. Si l'écartement de la rive est faible, on peut faire circuler sur l'appointement des grues à grande portée pouvant desservir la berge, ou un portique transbordeur appuyé d'une part sur l'appointement, d'autre part sur la rive.

Le dispositif, en association avec un mur de quai à fondation peu profonde, permet de décharger en même temps sur le quai et sur des allées amarrées entre le quai et l'appointement, par le moyen des grues à flèche ou portique. On dit que les biques de mâture permettent de décharger en même temps dans les allées attachées au flanc du navire. Le système est particulièrement intéressant dans les ports où une grande partie de la cargaison est chargée en allées. Il a reçu une application systématique au King George V Dock à Londres, dont le résultat est considéré comme concluant (Voir Minutes of proceedings of the Institution of Civil Engineers, vol. CCXVI, page 372 et De Ingénieur du 29-9-28)

Les appointements isolés ou réunis aux rives seulement par des claires voies ont reçu souvent des dimensions considérables dans les ports américains de la côte de l'Atlantique. On les appelle piers. Ils portent généralement des hangars; les plus récents ont des grues et des voies forcées. Il en existe de très importants en Amérique et en Angleterre, spécialisés pour le charbon et les minerais.

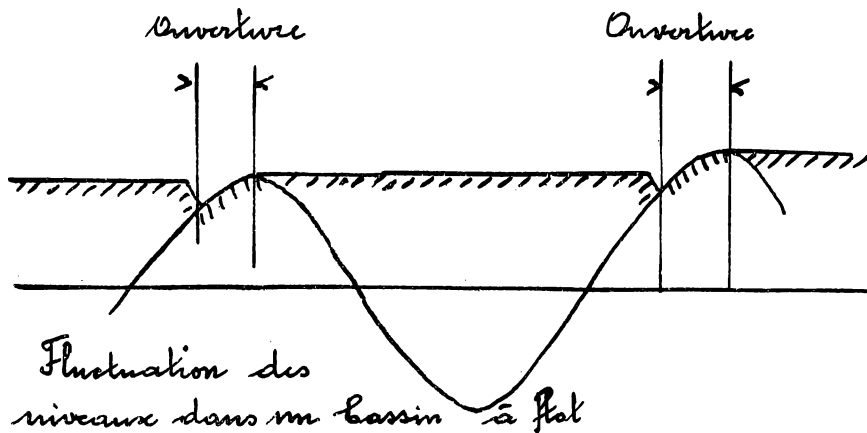
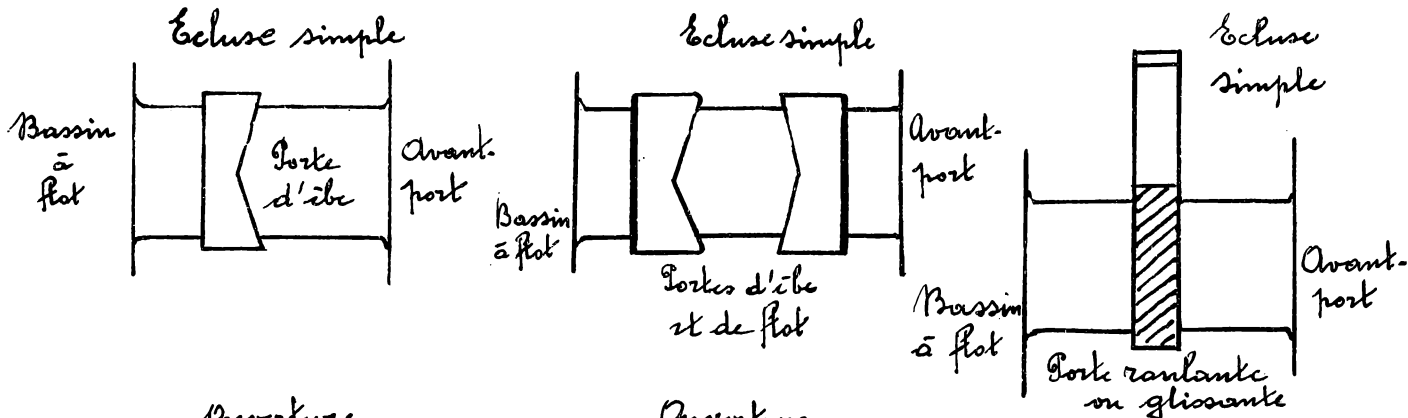
Les wharfs ressemblent aux appointements et aux piers, mais sont en principe seulement des estacades légères reliant la rive à des endroits de profondeur suffisante (au-delà de la barre d'un estuaire par exemple) pour permettre l'accostage des vedettes, chalands, petits navires, etc. Ils constituent souvent le moyen de transbordement provisoire ou sommaire des côtes coloniales. Ils sont construits en bois, ou mieux en charpente métallique sur pieux à vis. C'est ainsi qu'a été construit en 1892 le wharf de Kotonou, dans le Dahomey français. Les palées simples ont 8m. d'écartement; les palées doubles, 12m.; elles sont contreventées jusque sur le fond. Le wharf de Lomé, construit en 1904 dans le Togo allemand avait des portées de 24m., avec des poutres cantelées; les palées n'étaient pas contreventées. L'ouvrage a été détruit par une tempête en 1911; sa conception théorique et ingénieuse dans les détails, n'était pas appropriée à un ouvrage maritime et colonial.

4 Dues d'Albe — On appelle ainsi des constructions isolées, formées principalement de pieux groupés et contreventés, servant soit à l'amarrage des navires, soit de protection contre l'abordage d'ouvrages (ponts tournants, appointements, etc) soit à border des passes étroites (ponts mobiles, entrées d'écluses) on les dispose généralement en ligne, à des distances de 50m. au plus. Des lignes de dues d'Albe peuvent remplacer des appointements pour des bateaux de -

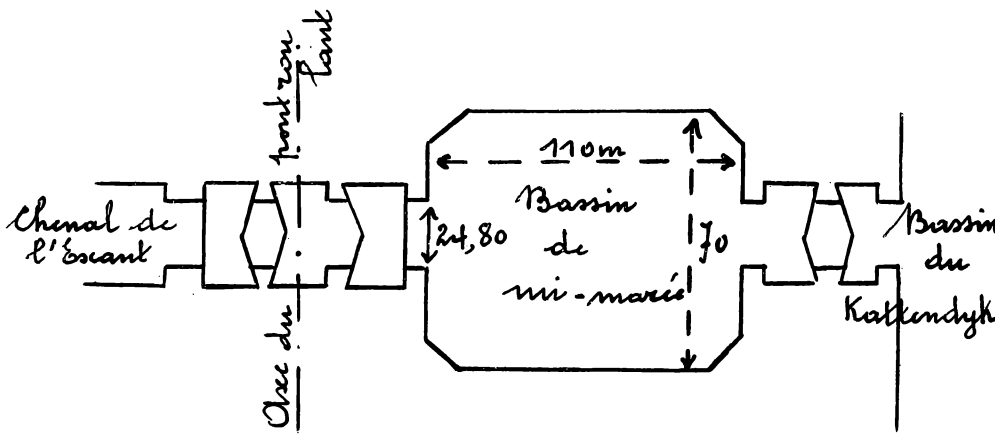
chargeant sur allèges (charbon, minerai) ou des pétroliers (pipe - lines posées sur le fond) ou des grains déchargés par élévateurs dans des chalands. Les dues d'Albe portent généralement des bollards et anneaux. Ils doivent pouvoir résister aux efforts d'abordage et d'amarrage des navires, au minimum 10 à 20 tonnes et jusqu'à 200 tonnes pour les derniers postes d'amarrage d'Ynniden. On les construit en bois ou en béton armé, au moyen de pieux assemblés en faisceaux ou solidarisés par des contreventements, soit au moyen de caissons en béton armé, à large semelle consolidée, échoués sur place, et lestés de béton. Les dues d'Albe en béton armé sont protégés des frottements par des ceintures en bois de sapin, suspendus par des chaînes et frottant sur des guides verticaux en bois dont les intercalaires sont garnis de matières amortissuses, fibres de coco, jute, etc. ...

5 Écluses maritimes. Généralités S'emploient dans les ports à marée pour séparer les bassins à flot des avant-ports soumis à marée. Les bassins à marée présentent de nombreux inconvénients : profondeur considérable, fluctuation gênante du niveau, courants, houle et invasement. Les courants de marée peuvent être très importants dans les entrées des bassins, ce qui fait limiter les superficies. On se soustrait à ces inconvénients par les bassins à flot, dont le niveau est sensiblement constant et égal à celui de HMO ou même de HMVE.

Un bassin à flot peut être séparé de l'avant-port par une tête d'écluse simple, comportant une porte de flot et une porte d'écluse ou une seule porte si elle est réversible (glissante ou roulante). Quelque temps avant marée haute, on égalise le niveau du bassin et de la mer, par des aqueducs, ou ventelles, et on ouvre les portes. Les entrées et sorties des navires doivent se

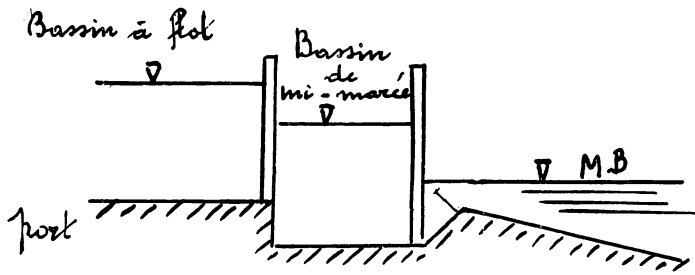


faire alors ; on reforme les portes à l'italie de haute mer ou peu après. La durée d'ouverture n'est donc que de quelques heures : 1, 2 ou 3 au plus, si la cote locale présente une itale de marée haute assez prolongée.
(de Haÿve)

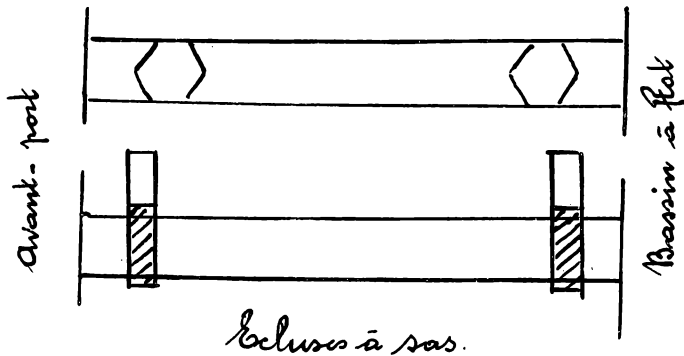


Il ya donc une lé-
gère fluctuation de
niveau, de quelques
décimètres à déduire
du mouillage, et qui
produit un certain
courant et une certai-
ne introduction d'eau,
éventuellement limo-
neuse. Le système ne
convient que pour les

petits bassins. (Bassin à mi-marée
du Kattendyk, à Anvers: 110x70m)



Un premier perfectionnement
consiste dans la création de bassins
de mi-marée, séparés de l'avant-
ports et du bassin à flot pour des
têtes d'écluse simples. C'est une es-
pèce de grand sas, plus profond
que le bassin, où les bateaux peu-
vent s'amarer et faire les opéra-
tions de port, mais aussi attendre
l'ouverture du bassin à flot. La
fluctuation de niveau y est plus
forte, de mi-marée à mi-marée en
passant par l'étale de haute mer.
La durée d'ouverture est donc de
six heures environ. L'accroisse-
ment récent des dimensions des éclu-



ses à sas supprime l'intérêt des bassins de mi-marée, d'ailleurs peu visités.

La véritable solution est celle de l'écluse à sas, c'est-à-dire comportant
deux têtes et un sas intermédiaire, permettant de communiquer à tout mo-
ment de la marée avec l'avant-port ou le bassin à flot. Toutefois, pour que
l'accès de l'écluse soit possible à tout moment de la marée, il faut un che-
nal en eau profonde, que l'on rencontre surtout dans les rivières à marées aux
rives concaves. Dans les ports côtiers, ces chenaux doivent être dragués. L'écluse
à sas, surtout pour les grands navires, est un ouvrage très coûteux d'établis-
siment, d'entretien et d'exploitation. Mais les avantages correspondants des
bassins à flot: profondeur réduite, plan d'eau fixe, manœuvres accélérées,
pas d'envasement ni d'entretien, peuvent compenser ces inconvénients et au-
delà, d'autant plus que la capacité des grandes écluses permet de desservir
de très vastes bassins (Anvers)

Un point capital est la sécurité de l'exploitation; il faut y veiller pour chaque écluse et, pour les grands bassins, les doubler (à Anvers les écluses Rogers et du Kruisschans permettent l'accès du Bassin-canal; l'écluse du Kruisschans sera doublée et une écluse sera construite à l'autre extrémité du Bassin-canal)

Enfin, notons que les écluses maritimes servent aussi à soustraire les canaux maritimes à l'action de la marée (ce qui en diminue la profondeur) les dimensions des écluses maritimes sont allées croissant et devenues considérables dans les grands ports. Voici quelques données.

Port	Année	Long.	long.	hauteur M.H.
St. Nazaire	1905	30m.	211 (116+77)	11,80 à 9,70
Le Havre	1907	30	241,80	12,35 à 10,65
Cardiff		27	255	12,60 à 9,60
Hollinau (1)	1914	45	330 (221+100)	16,94 à 11,68
Emden	1914	40	260	13 (V.E)
Newport	1914	30	300 (180+120)	13,70 à 10,70
Panama (1)	1912	33,53	305	12,50
King George V Dock (Londres)	1921	30	244	13,70
Anvers	1909 (Rogers)	22	180	10,50
	1928 (Kruisschans)	35	270	14,54 à 10
Ymuiden (en achèvement)		50	400	15 (VE)

(1): écluses doubles jumelées.

Les écluses dont la largeur est donnée par une somme de deux chiffres comportent une tête intermédiaire. Lessas de grandes dimensions, supérieures à celles des plus grands navires, ont pour but d'écluser le plus grand nombre de bâtiments en même temps, ce qui réduit les frais de manoeuvre, mais augmente la durée d'éclusage. Le plus souvent d'ailleurs, par suite des progrès successifs, d'anciennes écluses plus petites sont accolées aux modernes plus grandes et continuent généralement à assurer un service propre.

6 Construction des écluses maritimes - Elle est basée sur les mêmes principes que ceux qui ont été exposés dans le cours des écluses de navigation, adaptés aux circonstances particulières: grandes dimensions, chute faible, variable en grandeur et en sens (Ainsi, au Kruisschans, la flottaison fixe du Bassin-canal est +4,00; du côté de l'écluse PBM = -1,00 et PHM = +7,11. à Ymuiden, côté du canal -9,50 NAP; du côté de la mer PBM = -2,50 NAP, PHM = +3,69 NAP.)

Jusqu'à présent, les têtes d'écluses maritimes ont toujours été construites avec radice capable de résister aux sous-pressions en cas de mise à sec. Vu les grandes profondeurs, cela exige des dimensions énormes et des armatures importantes (7m. à Hollinau, 5m. au Kruisschans) Les têtes sont

alors séparés par un joint continu du sas. A Ymuiden, on a innové sur ces dispositions. Les têtes ne peuvent pas être mises à sec, sauf dans les parties correspondant au chemin des portes roulantes.

Le radier n'est relativement épais que sous cette partie, et les parties contiguës, moins épaisses, en sont séparés par des joints. En cas de réparation au chemin de roulement, on peut y échouer un caisson en béton armé, à chambres de lest d'eau, réservant une chambre de travail à l'air libre sur toute l'étendue du chemin de roulement. Le poids du caisson contribue à équilibrer la sous-pression et la flexion du radier se fait dans le sens de la largeur du caisson (15 m. environ) inférieure à la longueur du radier (50 m.) Le caisson ne subit pas de poussée; on laisse les niveaux s'équilibrer de part et d'autre par les aqueducs ouverts. Ce caisson obture en même temps la chambre de porte transformée en cale sèche, permettant de réparer la porte.

Les bajoyers sont très massifs et contiennent les dispositions nouvelles: vannes, etc. Vu les poids considérables qui rendent les tassements inévitables, les bajoyers sont fondés séparément des radiers, la liaison étant éventuellement réalisée après-coup par bitonnage d'un joint avec barres de liaison en attente (Kruisschans). En mauvais terrain, on fonde sur pieux (Ymuiden) le calcul de la fondation est complexe et doit être fait avec soin, notamment pour le report des fortes poussées horizontales sur le terrain, rendu délicat par suite du tronçonnement de l'ouvrage. A Ymuiden, on a compté sur la résistance à l'arrachement des pieux pour équilibrer partiellement les sous-pressions sur le radier de tête au service normal.

Les grandes écluses maritimes comportent presque toutes des portes roulantes, qui se retirent dans de grandes chambres accolées normalement aux têtes, et généralement doubles. (Il y a deux portes par raison de sécurité) Les chambres doivent pouvoir être mises à sec pour la réparation des portes; on les obture par un batardeau métallique spécialement prévu, ce qui n'interrompt pas le trafic de l'écluse, ou par un caisson comme à Ymuiden. La mise à sec de toute la tête, lorsqu'elle est possible, doit permettre la réparation en place d'une porte jumée qui serait avariée au point de ne plus être retirée dans son enclave. Elle serait alors mise à sec entre la seconde porte et une porte de l'autre tête, amenée par flottage au moyen de remorqueurs et échouée contre une battée spéciale: si la porte extérieure est avariée, la porte de secours devrait effectuer un trajet d'environ 15 km., dont plus de la moitié dans l'Éscaut, et traverser l'écluse Rogers. Les Néerlandais considèrent le système comme impraticable; il semble devoir être toujours possible de ramener la porte dans l'enclave. Ils font observer que la disposition exige des portes plus fortes, capables de résister à la charge totale de marée haute sur une face. Une telle condition était excessive pour une porte de 50 m.; cette constatation a probablement provoqué l'examen critique et l'abandon de la condition de mise à sec de la tête.

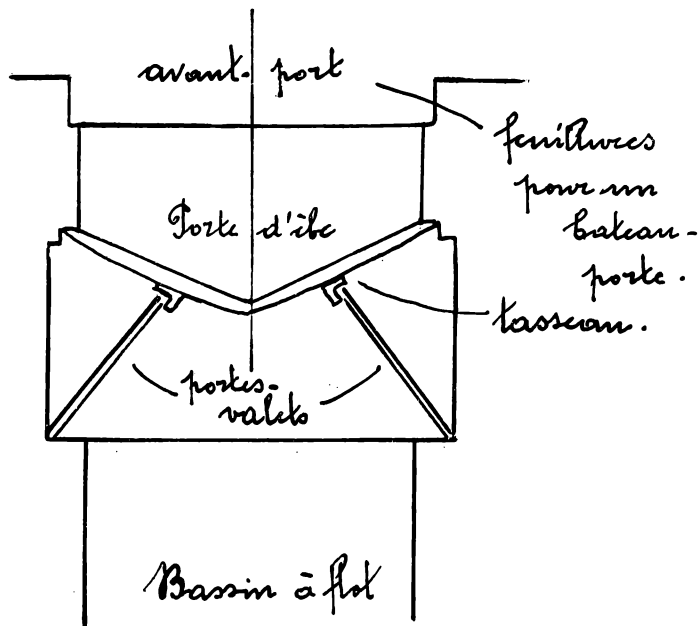
En terrain affouillable et perméable, les têtes reçoivent naturellement des paraf-
feuilles et ancrages en vue d'éviter les infiltrations et dérangements de terrain, ainsi
que de réduire les sous-pressions. Les radiers contiennent des tunnels pour cana-
lisations, etc. Il y a parfois un mur de chute, peu important (Panama, New-
port, canaux maritimes). Les sas ont des radiers minces, perforés pour éviter les
sous-pressions et des bajoyers indépendants. Au KrUISSEHANS, ils sont mas-
sifs, par suite de la présence des aqueducs. A Ymniden, les aqueducs con-
tourment simplement les têtes, on a donc pu donner aux bajoyers une
fondation haute sur pieux et plateforme; le pavement est prolongé jusqu'au
radier par des palplanches en béton armé. Le mur est renforcé par des nor-
vices et est drainé.

Sur fond rocheux, il n'y a pas de radier (St.-Nazaire)

La fondation haute réalise une grande économie et accélération du
travail. Il y a une tendance très forte à l'heure actuelle à réduire les revête-
ments des grands sas au minimum par l'emploi de palplanches en métal ou
béton armé. Le système est possible grâce aux nouvelles conceptions relatives aux
moyens de sassement, par ventelles ou aqueducs établis dans les têtes. Les
grandes chambres des portes roulantes allongent beaucoup les aqueducs, qui en
déforment les parois. En se basant sur des expériences concluantes effectuées sur
modèles en laboratoire d'hydraulique appliquée, on a fait passer l'eau de
sassement au travers de la chambre de la porte dans la tête intérieure de
l'écluse d'Ymniden.

Les aqueducs débouchent souvent dans les melaves des portes busquées
ou à un vantail, en vue de les éviter. Ils contourment simplement les têtes ou
règnent sur toute la longueur du sas, où ils débouchent au niveau du ra-
dier par des larrons évasés se faisant face. Pour amortir la force vive de
l'eau, à l'écluse du KrUISSEHANS, on a fait communiquer ces larrons avec
l'aqueduc par des orifices verticaux trianglés. A Ymniden, on a employé
l'orifice en biseau à la base et l'ouverture très progressive des vanes; il
n'y a pas de dispositif amortisseur, vu la grande masse d'eau du sas.
Au canal de Panama, le débouché dans le sas se fait par des orifices ver-
ticiaux dans le radier, les aqueducs étant sous les bajoyers. Quant au
mode d'exécution, on donne la préférence autant que possible aux feuilles
ouvertes épuisées (St.-Nazaire, Panama, Newport). Les progrès dans les
moyens d'épuisement, notamment le rabattement de la nappe aquifère par
puits filtrants (Holtencien, KrUISSEHANS, Ymniden) et les progrès dans la cons-
truction des batardeaux: béton armé et surtout palplanches métalliques (26 à
28m. de longueur) favorisent beaucoup ce mode d'exécution, même éven-
tuellement en site humide. Néanmoins, on a fait aussi usage d'air compri-
mé, par caissons fixes ou caissons mobiles, au Havre notamment, suivant
les dispositions exposées dans les cours de fondations et d'écluses de navigation.

7 Portes d'écluses maritimes. On emploie les portes busquées, les portes à un vantail, les bateaux-portes et les portes glissantes ou roulantes. Les portes busquées sont les plus anciennes. Elles sont encore employées pour les petites écluses, concurremment avec les portes à un vantail. Les bateaux-portes servent plutôt de portes de secours, et pour la fermeture des cales sèches. Les portes ne permettent pas de renversement de chute. Historiquement, dans les bassins à flot à écluse simple, on peut se contenter d'une porte d'ibe. Encore peut-il se produire au voisinage de l'équilibre, que la houle dans l'avant-port produise des renversements rythmés de chute, produisant un battiment des portes, qui les fatigue beaucoup. Pour éviter cela, on arc-boute parfois les portes busquées ou à un vantail exposés à la houle par des portes-valéts, tenant autour de poteaux-tourillons et s'appuyant sur des tasseaux fixés aux portes. Les portes ont une ossature comme les portes ordinaires, mais pas de bordage. En position ouverte, elles se



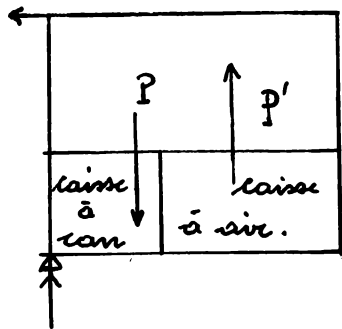
rabattent dans l'enclave derrière la porte (Écluse du Hâvre)

De même les bassins à flot peuvent être séparés d'un bassin de mer par une porte d'ibe ; les canaux maritimes également. Pour les écluses à sas, il faut généralement des portes d'ibe et des portes de flot à chaque tête, à moins que le niveau amont ne soit toujours supérieur à M. H., cas exceptionnel ou que l'écluse soit ouverte à marée haute. Les portes glissantes ou roulantes sont évitées et inconvénient ; elles sont réversibles. Pour les petites écluses, les portes à secteur ou en éventail ont le même avantage.

Les portes busquées se font encore en bois : chêne, greenheart, etc pour les petites écluses. Pour les plus petites, on adopte la même structure que dans les écluses intérieures. Les grandes sont généralement formées d'une ou de deux couches jointives de grosses poutres, solidarisées par des moises et recouvertes d'un bordage d'étanchéité. Les assemblages aux poteaux-tourillons et busquées sont faits au moyen de fers et l'indéformabilité est assurée par des écharpes. Les portes métalliques, de plus grandes dimensions, sont généralement cintrées et pourvues, au moins partiellement, d'un double bordage, comprenant des capacités étanches remplis d'air pour l'équilibrage. Mais il est en général utile d'avoir un double bordage sur toute la hauteur, pour la rigidité et la symétrie de la sollicitation de la porte. Seule-

ment, il faut que l'eau de mer ait accès dans les compartiments qui ne servent pas à l'équilibrage, sinon le poids varierait trop suivant la marée. Il faut aussi que l'eau puisse s'écouler à marée basse.

Les chambres d'équilibrage des portes tournantes doivent, autant que possible être sous le niveau de M. B V E, de manière que le poids de la porte soit invariable. Mais par suite des cheminées d'accès à ces chambres, qui sont souvent placées dans les poteaux tourillons ou busqués, une variation est inévitable, mais reste modérée. L'équilibrage ne doit d'ailleurs pas être complet, mais on peut néanmoins réduire les fatigues horizontales sur le collier et les tirants, en excentrant les caisses à air vers le



poteau tourillon, tandis que vers le poteau busqué, les chambres sont remplies d'eau. Des vannes et des conduites d'air comprimé permettent de régler l'équilibrage, d'isoler et de vider les chambres, etc. Cet équilibrage est très avantageux; le poids actif des portes métallique est peu variable et la traction horizontale faible. Au contraire, le poids actif des portes massives en bois varie fortement suivant la marée. L'étanchéité est assurée par des fourreaux en bois (chêne, greenheart)

La structure de l'ossature des portes est la même que pour les écluses de navigation intérieure, le type à aiguilles convenant bien par suite des grandes longueurs relatives. Il en est de même des portes à un vantail, qui reçoivent le plus souvent une section transversale renflée de bateau-porte, permettant de les mettre en place par flottage (écluse de Neancerville, au Havre). Les portes busquées à double bordage peuvent aussi être amenées en place éventuellement par flottage, dressées ou à plat.

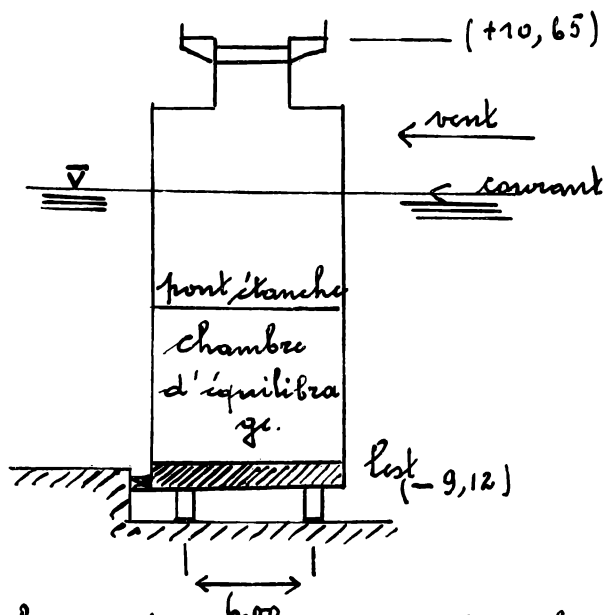
Les pivots et crapandins reçoivent les formes usuelles; il est bon d'assurer le graissage sous pression du pivot. Les poussés sur les heurtoirs sont élevés, ainsi que les pressions sur le busé que l'on fait en béton solidement armé et ancré (type de Panama) et garni d'un faux-busé en bois servant d'appui aux fourreaux des portes.

Dans beaucoup d'écluses françaises et anglaises, la manœuvre se fait par câbles ou chaînes noyées, commandés par vérins hydrauliques. Actuellement, on préfère la manœuvre électrique, par bielle et manivelle (type du canal de Panama), ou bien par crémaillère droite articulée, ou crémaillère droite à translation et bielle. Sauf pour les câbles, il faut un intermédiaire élastique entre la porte et le dispositif de manœuvre (ressorts Belleville toujours comprimés) et il est utile de disposer des butoirs hydro-pneumatiques de fin d'ouverture.

Les bateaux-portes seront décrits plus loin à propos des calés sèches.

Les portes glissantes, et principalement les portes roulantes, sont aujourd'hui le plus en faveur pour les écluses maritimes de grandes dimensions. Elles sont isostatiques et leur calcul est exempt des incertitudes relatives au calcul des portes busquées en charge. Par rapport aux portes à un vantail, elles ont l'avantage d'être appuyées sur le fond par de multiples galés et de n'être pas exposées à donner du nez et à gauche sous l'effet du poids et des efforts de manoeuvre. Il n'y a aucune gêne à leur donner la forte épaisseur nécessaire; cela n'allonge guère la tête ni l'encadrement de la chambre de porte normale à l'écluse. La longueur de cette chambre, supérieure à la largeur de l'écluse est le plus grave reproche qu'on puisse faire à ce type de porte, mais il est compensé par la diminution de longueur de la tête par rapport aux écluses à portes d'ibe et portes de flot. Toutefois, par raison de sécurité, on munit parfois les têtes d'écluse d'une double porte roulante; c'est le cas des deux têtes du Kruischans et de la tête extérieure à Ymuiden.

Pour réduire le poids dont provient la majeure partie de la résistance, les portes sont équilibrées par des chambres à air régnant sur toute la longueur sous le niveau des plus basses eaux. Au-dessus de ces chambres,



le bordage est généralement double, mais dans ce cas, l'intérieur est librement accessible à l'eau ou bien, pour réduire les pressions sur les tôles, on règle le niveau de l'eau dans la capacité supérieure étanche de la porte à un niveau intermédiaire entre l'amont et l'aval, au moyen de vannes (Zebrugge). Le réglage du niveau de l'eau permet aussi de régler le poids de la porte, qui est un élément de sa stabilité, notamment pour résister aux efforts transversaux des vents et des courants, ou de la haute pendant la manoeuvre. La capacité supérieure est vide lorsque la porte

Schema des portes de la cale sèche de Laminon (Brest)

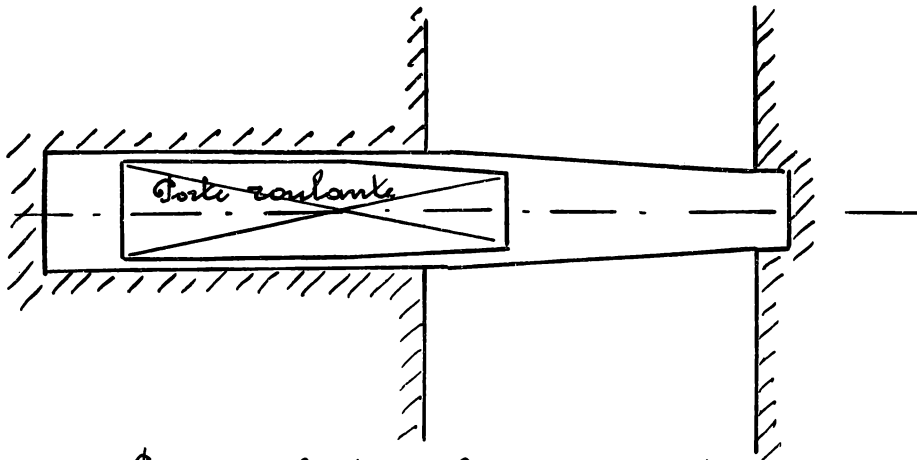
Par suite du double bordage et de la largeur importante de la porte, celle-ci peut flotter dressée, comme un bateau-porte. Pour réaliser la plus grande stabilité de flottaison possible, avec le moindre tirant d'eau, on établit les chambres d'équilibre le plus haut possible et on charge la partie inférieure d'un lest fixe, parfois très considérable (1.550 tonnes à St-Nazaire). Le lest doit être bien arrimé et les caisses à air sont cloisonnées pour éviter les déplacements du lest d'eau variable, in-

traduit dans les chambres d'équilibre latérales (water-ballast) et permettant le réglage du poids. Par suite de la forme peu favorable au point de vue de la stabilité de flottaison, on impose que le centre de gravité se trouve sous le centre de poussée. Il faut que les portes puissent s'introduire et sortir aisément des chambres en flottant; les entrées doivent recevoir à cet effet les dégagements nécessaires pour permettre une obliquité suffisante des portes pour éviter. Les opérations doivent être évidemment conduites avec précaution, par amarres et treuils.

Les portes ont une structure formée de deux ou plusieurs toises principales (4 au Krusschans), en treillis à larges mailles, sur lesquelles prennent appui des aiguilles; celles-ci supportent à leur tour les bordés par l'intermédiaire de traverses et de raidisseurs. En outre, des diagonales assurent le contreventement longitudinal et transversal. Les bouts sont parfois légèrement obliques en forme de proue (portes de Lebrunze et du Hâvre) en vue de faciliter le dégagement de la porte flottante. Le bordage est en tôles planes, cimbées ou bouclées (ces dernières plus légères). Il y a au moins deux ponts étanches, limitant les chambres à air, accessibles par puits et échelles. En outre, la partie supérieure porte généralement un pont de circulation, revêtu d'une planche. Le pont sert d'accès aux organes de manœuvre des vannes, des tubes d'air comprimé, éventuellement de ventilateurs, aux puits de visite, etc. Parfois il sert de passage public et peut même porter des voies forcées, mais alors la chambre de porte doit être recouverte d'un tablier mobile (de préférence à un tablier fixe, qui exige que le plancher supérieur de la porte roulante soit baissant) la porte du Hâvre porte une voie forcée sur entretoises, supportées par les bordés qui ont été rapprochés dans ce but; c'est une disposition exceptionnelle. Les appuis fixes consistent en un double busse, parallèle ou légèrement convergent, et en doubles battés en regard, pourvus de fers en bois pour l'étanchéité et le réglage. Le changement de sens de pression s'accompagne d'un jeu de quelques centimètres, mais aussi réduit que possible, surtout s'il y a une voie forcée sur la porte. (1 à 2 cm. au Hâvre) Si les bouts sont inclinés, les bajoyers de tête et les battés d'appui présentent le même frottement, ce qui facilite le dégagement. La convergence légère des buses sert à réduire le jeu transversal. A Ymniden, il n'y a pas d'appui sur les buses; la partie inférieure des bordés est flexible et garnie de fers en bois appliqués par la pression sur les parois latérales de l'encoffrement de la voie de la porte, dont la profondeur est réduite.

Les galets sont en règle générale, fixés à la partie inférieure de la porte; ils roulent sur une voie de roulement métallique scellée entre les buses et ils doivent permettre le jeu. A Ymniden, ce jeu est de 5 cm. de part et d'autre et il y a un rappel par galets et plans inclinés. Les rails sont du type long, en acier coulé, posés sur poutrelles noyées dans le radier. Le dispositif de fixation et d'élissage doit permettre l'entraînement facile

sous eau, notamment à l'entrée des chambres de porte, pour la pose du batardeau. Il n'y a en général que deux trains de galits, chaque train d'un nombre convenable de galits (8 au Krusshans et à Ymniden, 4 à Leuzengge et au Hâvre). Les charges sont égalisées entre les galits par des balanciers à rotules (Krusshans, Ymniden). En service, elles sont réduites, mais les galits doivent pouvoir supporter la charge de la porte à sec ou complètement remplie d'eau. Cette condition a été aussi abandonnée à Ymniden, où les galits peuvent supporter au maximum le poids de la porte lorsque deux raisonn d'équilibrage sont vidés par accident (320 tonnes au total pour les deux bunks). Les galits sont accessibles par des chemins pourvus d'échelles, aboutissant à des raisonn à air comprimé dans lesquels sont les galits. La cheminée porte un sas à la partie supérieure. Dans certaines portes allemandes, toute la partie inférieure de la porte cons-



Porte roulante à buses convergentes.

titue ainsi raison, permettant l'entretien et la réparation des voies de roulement, etc., en service. L'étanchéité est assurée par des fourreaux en bois établis sous la porte et glissant à frottement doux sur le radier ou mieux, par le joint élastique du type de la porte d'Ymniden. En cas d'avarie aux chariots, la porte doit pouvoir être transformée en porte glissante. Au Krusshans, ce sont les fourreaux inférieurs préannelés qui doivent prendre appui sur des glissières en pierres de granit poli, à joints arrondis pour éviter les arrachements en cas de saillies. La même disposition existe à Ymniden. La manœuvre est la suivante: on soulève légèrement la porte par réduction du lest d'eau, ce qui dégage les bunks de roulement. On retire la porte dans son enclave de la sorte, puis on réintroduit le lest et on règle la pression d'appui sur les glissières.

En résumé, ces portes très perfectionnées constituent des fermetures très sûres en exploitation et d'un réglage aisé par le jeu des chambres d'équilibre et du water-ballast.

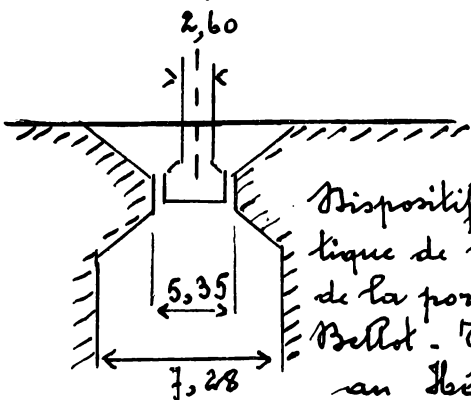
Les portes glissantes sont identiques en principe, sauf l'absence de chariots et de voies de roulement, remplacés par des quilles de glissement en tôle (Portsmouth) et des glissières en granit.

Les portes glissantes sont identiques en principe, sauf l'absence de chariots et de voies de roulement, remplacés par des quilles de glissement en tôle (Portsmouth) et des glissières en granit.

Les portes roulantes peuvent recevoir des ventilateurs. Celles du Krüsschans comportent des pompes et des tubes permettant d'envoyer des jets d'eau dans l'écoulement de la voie pour délayer les boues, puis les aspirer et les déverser dans des chalands. On peut aussi y pratiquer des chasses sur le radier par des petites vannes établies dans le bas des portes.

Les enclaves ont généralement la largeur strictement nécessaire à l'entrée pour permettre le dégagement des portes; au-delà, elles s'élargissent, afin d'être assez spacieuses pour permettre le mouvement de l'eau et le radoubage des portes. La fermeture se fait dans ce cas par un batardeau métallique spécial (caisson métallique flottant et échouable) s'appuyant sur des feuillures ad-hoc, étanchées par des fourreaux en bois.

L'invasement du fond de la chambre en service peut être combattu par des chasses; d'ailleurs le mouvement de l'eau lors de la rentrée des portes suf-



Dispositif schématique de l'entrée de la porte roulante
Bellot - Cameroville au Havre.

fit pour évacuer les boues. Le mouvement de l'eau s'effectue éventuellement par des aqueducs de chasse. Les dispositifs de nettoyage propres des portes, tels que ceux du Krüsschans, rendent tout-fois ces aqueducs superflus.

Au sujet des efforts et dispositifs de manoeuvre, je me réfère au cours d'iclusis. Les très grandes portes, telles que celles du Krüsschans, se ma-

noeuvent actuellement par un treuil tracteur roulant sur le couronnement des parois des chambres de portes et attelés élastiquement aux portes. La commande s'effectue par pignons engrainant avec des crémaillères fixés aux parois ou par des tambours hâtant sur des chaînes ou câbles. On prévoit l'appareillage habituel de sécurité: interrupteurs de fin de course, freins électro-magnétiques, hermites. La manoeuvre d'ouverture normale se fait en trois minutes au Krüsschans. La porte d'Ymniden pèse au total 1175 tonnes.

8 Organes de manoeuvre et de sécurité des iclusis maritimes -

Les manoeuvres sont généralement électriques; les moteurs sont abrités dans des cabines ou des caves et la commande est autant que possible, centrale. Les moteurs, pompes, etc. établis dans les portes sont placés dans une chambre, à l'intérieur de l'ossature, de manière à dégager le plus possible le pont supérieur.

Les aqueducs sont obturés par des vannes cylindriques ou Stoncy, largement équilibrées, vu leurs dimensions et leurs poids. Le portin des vannes Stoncy du canal de Panama est divisé en deux par une petite

pile finement profilée, en béton armé.

Des cabotans ou tracteurs facilitent l'entrée des navires; des bollards solidement ancrés en arrière des bajoyers légers ou dans les bajoyers massifs servent à l'amarrage (100t. à Ymiriden)

Des dispositifs de protection et de sécurité doivent être prévus pour les grandes écluses maritimes, pour prévenir les risques très réels d'abordage par les grands bateaux et en diminuer les conséquences.

Les chenaux d'accès doivent être assez longs et convergents, pour que les bateaux entrent dans l'écluse en bonne direction; ils sont bordés d'artecade et de dues d'Albe très solides, permettant l'amarrage en attente et le passage de câbles de halage. Les navires doivent stopper à l'entrée et sont halés dans l'écluse. Des chaînes de protection sont tendues entre les bajoyers des têtes à distance suffisante des portes, pour présenter un obstacle élastique à l'abordage des portes par un bateau qui n'aurait pu briser son coque. Lorsque la porte est ouverte, la chaîne est larguée et se dépose dans une rainure sur le fond du radier (Panama, Ymiriden)

La chaîne est tendue par des vérins hydrauliques à soupape de sûreté (pression de service à Panama: 4K⁰², soupape réglée à 52 K⁰²) La tension maximum de la chaîne est de 100 tonnes, la course possible du navire est de 21 m., ce qui suffit à arrêter des navires de 5000 à 60.000 tonnes de déplacement, à des vitesses respectives de 5½ et 1 noeuds. La course de protection est parfois supérieure (90m. aux portes supérieures de Gatun - Panama)

Le long des artecades et des bajoyers, on dispose des flotteurs de protection, petits radcaux élastiques en bois de sapin, maintenus appliqués par des chaînes verticales tendues par des bsts en fonte. Dans les petites écluses, on scelle dans les bajoyers, des fourneaux verticales ou des ventrières horizontales en chêne ou greenheart. A Panama, ces ventrières sont appuyées sur des ressorts et peuvent pénétrer dans le mur. Des flotteurs élastiques sont préférables.

Dans les écluses à portes roulantes ou glissantes, il y en a généralement au moins une de réserve, qui sert comme fermeture de secours. Avec les autres types de portes, il faut des fermetures de secours spéciales. Dans les petites écluses, ce sont des rideaux de pontrelles en bois. Les pontrelles métalliques permettent de réaliser de grandes portées, et à la Nouvelle Orléans, pour l'écluse du canal maritime, de 22,90m. de largeur, 9,15 de mouillage sur le buse et 5,80m. de chute maximum, on a prévu des pontrelles de 25m. creusées et pouvant flotter. Elles peuvent ainsi servir en amont et en aval. Elles sont mises en place par un pont tournant équilibré, dont le pivot est sur un bajoyer et qui dessert le dépôt de pontrelles disposé en étoile autour du pivot. L'accrochage

se fait par un crochet à dévissage automatique lorsque la pontonelle est en place (action d'un poussoir) le système a coûté 353.000 dollars, mais est considéré comme supérieure à celui du canal de Panama, appliqué ensuite au canal de Sté-Marie (Ismarda), et dont la manoeuvre s'est révélée précieuse. Il s'agit de barrages à montants articulés et vannettes suspendus à un pont supérieur tournant, et qui vient obturer l'écluse par rotation en cas d'accident aux portes. En 1909 au canal de Sté-Marie, lorsqu'on dut manoeuvrer le pont par un courant de 4,50 m/sec., il fut endommagé et ne put être utilisé qu'au bout de cinq jours. Le système des pontonelles excelle par sa simplicité. Le pont ^{tournant} de Panama a coûté 432.000 dollars pour la même profondeur et 33,55 m. de largeur. (Proceedings of the Am. Soc. of Civil Engineers, décembre 1927 - Génie civil, 28 Avril 1928)

Souvent on dispose des ponts mobiles sur les têtes d'écluses; si l'on en met un sur chaque tête, le passage n'est jamais interrompu. Mais ces ponts gênent toujours l'exploitation de l'écluse.

En terrain affouillable ou meuble, il faut de longs avant et arrière-radiers. On les fait en fascines liées et tumées, en pavage de grandes dalles ou dalles de béton sur couche d'argile et gravier, avec cloisonnement de parafouilles perpendiculaire à l'axe de l'écluse. Il faut proscrire les enrochements pile-mêlé, dangereux pour les coques des navires qui talonnent ou s'échoueraient.

9 Ponts mobiles et tunnels - Le trafic important des ports exige de nombreux moyens de franchissement, surtout pour les routes, les voies ferrées pouvant généralement contourner les installations. Comme les passages doivent laisser subsister un tirant d'eau très considérable pour les grands navires (40 à 50m), on ne peut généralement pas établir de ponts fixes dans les ports maritimes; il faut des ponts mobiles ou des souterrains. On peut établir des viaducs assez élevés sur les rivières; il en existe de nombreux en Amérique et en Angleterre (Pont du Forth, etc.) ainsi que sur le canal de la Baltique)

Les souterrains ont déjà reçu de nombreuses applications; ils constituent la meilleure solution du problème au point de vue de la capacité et de la sécurité du trafic, moyennant une stricte discipline et une bonne ventilation. Ils sont très coûteux et exigent un grand développement, à cause des rampes.

Les ponts mobiles sont infiniment moins coûteux, mais constituent des goulets pour les navires et rendent le trafic routier intermittent. Pour parer à ce dernier inconvénient, on peut établir les ponts jumelés, à une distance supérieure à une longueur de navire. L'un d'eux au moins est fermé à tout moment. Moyennant une signalisation adéquate, le trafic rou-

Le pont n'est jamais arrêté (ponts basculants sur le bassin-canal à Anvers.)

Comme ponts mobiles, on emploie les ponts tournants, les ponts basculants (très appropriés) et les ponts levants (exceptionnels à cause de la grande hauteur de levage.) Les ponts tournants et les ponts basculants sont souvent à double volée, ou les grandes portées. Sur les estuaires et canaux, on emploie les ponts tournants symétriques à grande portée. (Pont de Caronte) Sur les têtes d'écluse, on emploie quelquefois les ponts roulants, qui ne sont cependant plus guère en faveur. On emploie aussi les ponts transbordeurs, les transbordeurs sur radier, les bacs automoteurs (Anvers) et les ponts flottants à passe mobile. A Constantinople (Corne d'Or) le pont flottant de 1912 a 466 m. de long et 25 m. de large. Il livre passage aux tramways et voitures. Il est établi en double rampe sur douze pontons rectangulaires à fond plat. Pendant la nuit, la partie mobile de 62 m. est ouverte pour le passage des navires. Le sous-sol est très inconsistant et la profondeur atteint 40 m. Dans des conditions analogues, on a cependant (en 1925) construit à Stockholm un grand viaduc à travée basculante (voies courbes de fondations)

Des dispositifs de protection analogues à ceux décrits pour les écluses doivent être établis, dans une mesure plus ou moins étendue, aux abords des ponts mobiles, pour éviter leur abordage, tant en position fermée qu'ouverte. (ponts tournants)

10 Embarcadères. Pour le débarquement et l'embarquement des passagers des navires et passages d'eau, mais aussi pour l'accès des véhicules sur les pontons et des trains sur les ferry-boats, il faut des dispositifs spéciaux dans les ports à marée. Pour les passagers, on peut établir des plateformes fixes à divers niveaux dans des ouvrages à claire-voie, accessibles par escaliers et reliés aux navires par passerelles volantes.

Pour les pontons recevant des véhicules, la solution ordinaire est celle de l'embarcadère flottant sur pontons plats, portant un tablier au niveau du pont des bacs. Les tabliers doivent être assez longs de manière que la rampe (à M H) ou la pente (à M B) reste modérée (5% maximum.) On est donc obligé de les établir dans des mouvements normaux aux rives, à fond en pente légèrement supérieure à la pente maximum du tablier. Les mouvements protègent l'embarcadère contre la houle. La partie de l'embarcadère saillante sur la rive doit être protégée par des estacades et dues d'Albe, les pontons doivent être guidés ou amarrés. Les bacs ne peuvent d'ailleurs s'attacher à l'embarcadère. Un tablier doit être établi entre l'embarcadère et le bac, pour éviter des dénivellements et des accidents lors du passage des véhicules.

a Flessingue, pour des raisons découlant d'un emplacement restreint,

on a établi récemment un embarcadere formé d'un tablier mobile levant, suspendu par chaînes à des portiques. Le bac accoste dans un renfoncement spécial, comme un ferry, et le pont repose par son extrémité sur le bac, pour éviter les dénivellations au passage des charges. Les manoeuvres de levage et de descente sont électriques.

Le sont des dispositifs tout à fait analogues, mais plus importants que l'on emploie pour les ferries. Ceux-ci doivent accoster par la poupe dans un chenal de forme évasée, bordé d'escalades et de flotteurs de protection, qui amène les rails du ferry en coïncidence exacte avec ceux du tablier mobile. Le dernier repose sur la poupe du ferry. L'embarcadere se compose d'un certain nombre de travées, articulées sur des traverses de support suspendues dans des portiques par le moyen de chaînes, câbles ou vis sans fin, permettant le levage ou la descente. Les traverses sont plus ou moins équilibrées (pour le poids propre seulement). La longueur totale est telle que la rampe reste modérée. Il faut de solides dispositifs frontaux et latéraux d'amarrage et d'amortissement des chocs (garnitures élastiques, butoirs, etc.) Généralement les embarcades sont jumelées. Les ferries portent deux voies, dont la bifurcation est sur le tablier mobile.

11. Outillage, voies et hangars. Les questions, très vastes lorsqu'on les examine en détail, peuvent faire l'objet d'un cours. Nous ne pouvons songer ici qu'à les effleurer et à signaler leur importance. L'ingénieur des constructions civiles trouve dans son enseignement général tous les éléments qu'il faut pour résoudre ces questions et qui dépendent surtout des cas concrets. L'ingénieur chargé d'une telle étude se documentera pour le choix des dispositions principales, dont ses connaissances lui permettent de déterminer ensuite tous les éléments.

L'engin fondamental de l'outillage des quais est la grue mobile tournante, généralement à portique et à commande électrique ou à vapeur. La commande hydraulique, longtemps en faveur, cède maintenant devant l'électricité. La puissance courante est de 1,5 à 2 tonnes pour les grues à marchandises diverses, 3 à 5 t. pour les quais à matière pondéreuse. Le nombre des grues varie de 3 à 6 pour porte de 125 m. dans les ports bien outillés. Le rendement journalier est d'environ 150 tonnes avec la grue de 1,5 t., 300 tonnes avec la grue de 3 t. et 500 t. avec celle de 5 t. La vitesse de déchargement journalière doit être d'au moins 500 à 1000 t. avec des bateaux de 1500 à 6000 t. de port en lourd.

Un outillage spécialisé existe généralement pour divers trafics importants : grains, charbons, minerais, pétroles, etc. Un port doit posséder en outre des engins de grande puissance, grues ou biques, soit fixes, soit de préférence flottantes. On construit des grues flottantes jus qu'à 200 t.

Un réseau bien développé et bien ^{disposé} est essentiel à l'exploitation d'un port. On estime que le développement total des voies doit atteindre 12 à 14 fois celui des quais. On distingue les voies de manutention à quai et le long des hangars, dépôts et autres endroits à destination où l'on charge et décharge. Elles sont reliées par des voies de circulation à la gare de triage où l'on compose les trains avant leur expédition et où l'on forme les rames vides pour la desserte du port. Pour assurer le rendement, les manœuvres doivent se faire par rames complètes, au moyen de locomotives, ce qui exige que toutes les liaisons soient faites par aiguilles et que les courbes aient un rayon assez grand. De là l'avantage des mâles en dents de peigne, dont les faisceaux se raccordent avantageusement aux voies de circulation.

Il faut une rame de 45 à 60 wagons de 10 à 20 T. par bateau. Dans ces conditions, le nombre de voies à quai desservies d'un côté doit être avec le nombre de postes d'accostage, de 3 à 5, pour 3 à 7 postes. On ne peut donc guère dépasser pour les mâles des longueurs de 500 à 1000 m.

Pour les quais spécialisés, le rendement est généralement supérieur (300 à 1000 T par heure et par poste de manœuvre); il faut donc ici surtout de puissantes gares de formation et une circulation toujours assurée, par deux extrémités. Généralement, il y a un dépôt le long de ces quais, de telle sorte que les points de trafic peuvent être mis en stock, le matériel roulant étant organisé pour la moyenne journalière. Parfois d'ailleurs, toute la marchandise passe par le stock.

Les hangars sont des endroits de dépôts couverts sans étages. Établis parallèlement aux quais, continus ou discontinus, ils ont de 50 à 150 m. de largeur et une longueur toujours grande. Ils sont établis au niveau du sol ou à hauteur de chargement des wagons, totalement ou en partie. Ils sont bordés de voies sur les deux faces, des voies même sont établies dans les plus grands. La construction comporte deux appuis et une toiture, parfois des cloisons légères d'abri contre les intempéries. On les fait en bois (danger d'incendie) fer ou béton armé. La construction charge peu le terrain; la surcharge provient des marchandises et est relativement modérée.

Les bâtiments à étages servant au dépôt et à la manutention sont des magasins. Généralement plus étroits et moins longs que les hangars (20 à 40 m. de long.) ils surchargent plus les terre pleins, à cause du poids propre et de l'entassement de produits aux divers étages. Le terrain étant généralement mauvais, le point capital de la construction est la fondation, sur semelles, plateau ou pieux. Parfois une partie du magasin ou hangar empiète sur l'apportement, surtout pour les divers pous-sables et non pondéreux (marée dans les ports de pêche). Les magasins se font surtout en béton armé. Les dispositions particulières dépendent

de la destination. Toutes les manutentions sont généralement mécaniques : transporteurs, ascenseurs, toboggans, etc. Des voies ferrées et charbonnières traversent les grands magasins, qui peuvent constituer de véritables usines : frigorifiques, etc.

Les quais et voies de port doivent être puissamment éclairés la nuit par la lumière électrique.

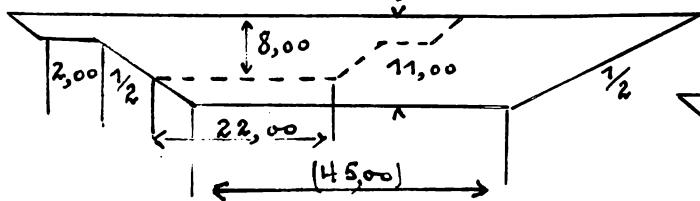
12. Canaux maritimes. Ils donnent accès aux navires de haute mer et se distinguent des canaux de navigation intérieure par leurs dimensions. Ils se classent en deux types principaux : 1° les canaux de pénétration, généralement en plaine (canaux de Bruges, de Gand à Zornuzen, de Bruxelles maritime.) Ils ont un caractère de canal latéral ; 2° les canaux de jonction de mers ou de percement d'isthmes, qui peuvent avoir un bief de partage (canal de Panama)

Ils peuvent être sans écluses, comme le canal de Suez, malgré une dénivellation aux extrémités, à condition que la vitesse du courant, qui peut varier de sens, ne soit pas trop élevée (1 m/sec. max. par ex.)

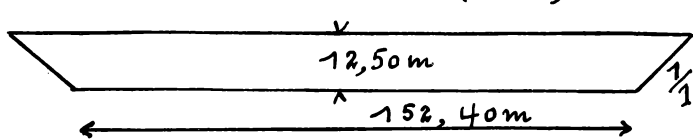
Mais ce cas est exceptionnel et ne peut se présenter que lorsque les dénivellations de marée et de houle sont assez faibles. Généralement, à cause de ces dénivellations, il est préférable de séparer le canal des bassins à niveaux variables par une écluse et de le constituer de biefs à flottaison peu variable, dont le nombre dépend des caractères hypsométriques du terrain et du tracé. On réduit de la sorte les traversements, on facilite la navigation et l'entretien (pas de courants ni d'alluvions.)

Les sections dépendent des dimensions des navires que l'on peut admettre dans le canal. Des canaux dont la fonction est essentielle, comme ceux de Suez, de Panama, etc. doivent pouvoir livrer passage aux plus grands navires.

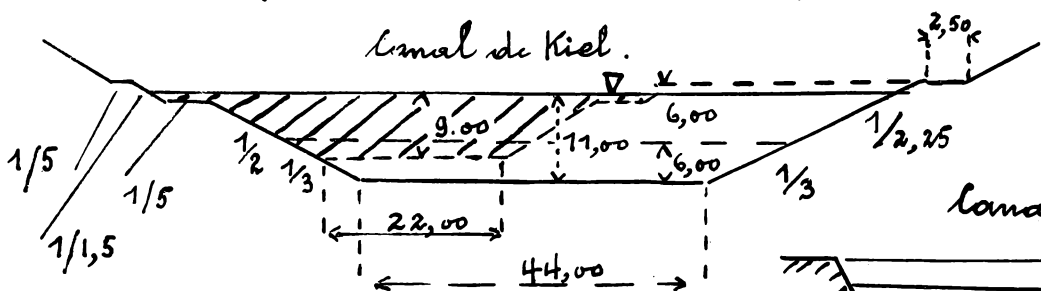
Canal de Suez (740m²)



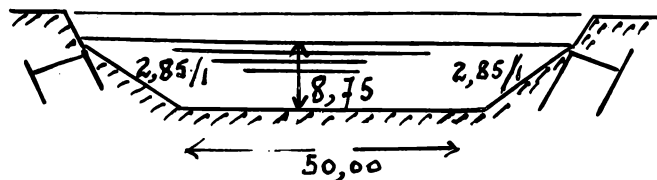
Canal de Panama (2062,50 m²)



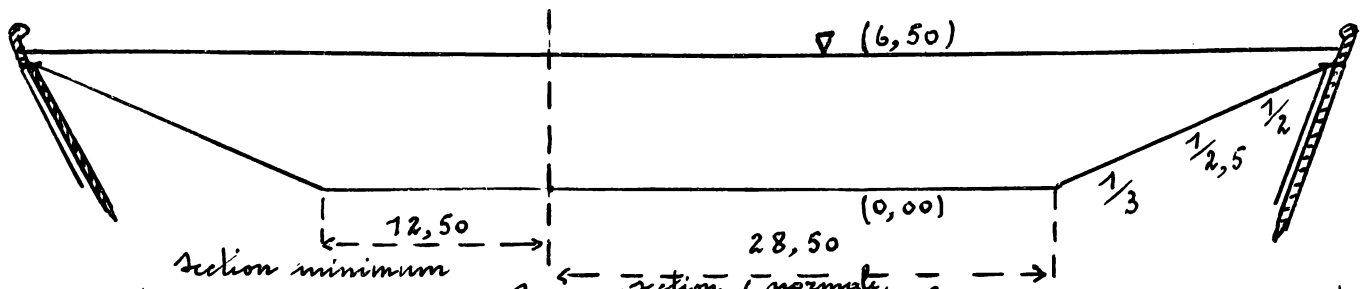
Canal de Kiel.



Canal de Gand à Zornuzen



Canal maritime de Bruxelles



Nous retrouvons la difficulté qui résulte de la croissance constante des dimensions des navires, que nous avons indiquée plus haut. Les canaux limitent pour une longue durée les dimensions des navires affectés aux routes sur lesquelles ils sont établis. Ci-dessus, les sections courantes actuelles du canal de Suez et du canal de Panama. Le canal de Kiel, construit dans un but militaire, a des dimensions supérieures à celles du canal de Suez.

Les canaux reliant à la mer des ports qui prétendent à une importance mondiale doivent également recevoir des dimensions analogues. Le canal reliant Amsterdam à la mer du Nord a 50m de largeur au plafond, et 9,80 m. de mouillage; les talus sont à 3:1. Mais on projette de porter bientôt la largeur au plafond à 75m. et le mouillage à 12,50m. Le canal sera donc un des plus grands du monde. Ultérieurement, la largeur pourra être portée à 100m. au plafond et le tirant d'eau à 15m.

Les canaux maritimes belges, comme le canal maritime de Laen. (France) ont une destination plus modeste; ils sont construits en vue de mettre en relation avec la mer des ports d'importance secondaire, comme Grand, ou même subordonnés, comme Bruxelles. Ils ne reçoivent que des navires de tonnage faible ou moyen. Ci-dessus les sections courantes des canaux de Grand et de Bruxelles.

L'influence du rapport n de la section mouillée au maître couple sur la marche des bateaux est considérable; d'autant plus que la vitesse admise pour les vapeurs doit être nécessairement assez élevée. Le maximum est généralement voisin de 10 à 12 Km./h. (6 noeuds) Elle peut être plus élevée si le canal traverse, comme celui de Panama, des lacs assez profonds. A la vitesse de 13 Km./h., on a constaté sur le canal de Suez qu'un bateau de 17342 t. de registre brutes provoquait une dépression de 1,37m. du plan d'eau, pour $n = 6,9$. En aucun cas, n ne peut descendre en dessous de 5.

La croissance constante des dimensions des bâtiments fait que le croisement des navires de dimensions exceptionnelles ne peut être généralement assuré. Pour le permettre, on prévoit à des distances convenables (12 Km. par exemple, correspondant à une heure de marche), des élargissements de 600 à 1000m. de longueur et de plus de 100m. de largeur. L'élargissement est parfois bilatéral, surtout lorsqu'on veut permettre le virage (canal militaire de Kiel. Les courbes doivent être de très grand rayon (1500 à 2000m) sinon

on donne une surlargeur $\Delta l = \frac{l^2}{2R}$, l étant la longueur des plus grands navires et R le rayon.

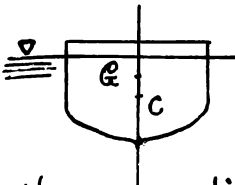
En principe, les canaux maritimes ne présentent pas de différences par rapport aux canaux de navigation en ce qui concerne la construction, l'alimentation, les étanchements, etc., sous réserve de l'ordre de grandeur. Le canal maritime de Bruxelles, p. ex. est alimenté par la petite Senne, en temps ordinaire. En temps de pénurie, on prélève $3m^3/sec.$ dans le Rupel à Winttham et on remonte l'eau par pompage, de bief en bief au moyen de 3 stations. L'alimentation naturelle présente souvent l'inconvénient d'introduction des vases, qui oblige à draguer. Il est bon de laisser décanter les eaux. A Bruxelles, on admet l'eau de la Senne dans le bassin de jonction, où les limons se déposent et que l'on drague périodiquement.

Le point le plus spécial réside dans le revêtement des berges, principalement au plan d'eau à cause des remous violents dus au passage des vapeurs. Il faut donc des revêtements plus importants et solidement assis, de manière à éviter l'affouillement des terrains meubles, tant au pied que derrière le revêtement. En principe, il est utile de revêtir les talus sur toute la hauteur. On peut employer le système des murs à fruit assez faible; la fondation doit être bien assurée. Pour réduire la hauteur du mur, on lui donne une fondation surélevée, le talus inférieur étant recouvert de béton, d'un peu maçonnerie, d'enrochements ou de palplanches (canal maritime de Bruxelles) Il est préférable de conserver le talus d'inclinaison normale et de le revêtir de dalles de béton (système Bourault), de maçonneries de briques dures ou de pierres sèches ou même d'enrochements échoués sur le talus. Le dernier système s'emploie notamment lorsque le canal est creusé par dragage. Il est nécessaire d'établir un filtre de gravier sur pieuvres graduées entre le terrain et les pievres.

Chapitre VI

Etablissements de radoubage.

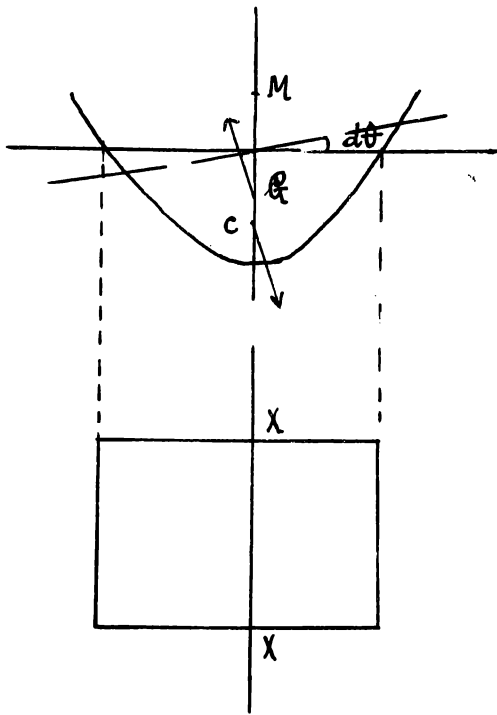
1 Rappel de notions relatives à la stabilité des flotteurs. En vertu du théorème d'Archimède, le poids du flotteur, dont la résultante passe par son centre de gravité g , est équilibré par la poussée de l'eau, égale au poids du volume d'eau déplacé, passant par son centre de gravité C ou centre de careène, mais agissant en sens inverse, c'est-à-dire verticalement vers le haut. Le plan d'eau constitue le plan de flottaison; il limite la partie immergée du flotteur, appelé careène, dont le volume est dit volume de careène. Les diverses flottaisons d'un flotteur de poids constant, déterminant des volumes de careène égaux sont dits isocareènes.



Les flotteurs pratiques ont généralement au moins un plan de symétrie vertical contenant l'axe longitudinal. A l'état de repos, en eau calme, la ligne de flottaison est donc une courbe plane symétrique, dont l'axe de symétrie coïncide avec le grand axe de son ellipse d'inertie, le petit axe lui étant perpendiculaire (direction transversale)

Pour produire une flottaison isocarène différente de celle du repos, il faut appliquer au flotteur un couple à axe horizontal. Il en résulte une inclinaison θ déterminée et limitée du plan de flottaison si l'équilibre du flottement est stable. Le couple de renversement est alors équilibré par le moment des poids ou par le moment des formes. La stabilité de poids est réalisée lorsque G se trouve en-dessous de C ; elle est absolue. Mais elle exige un lest fixe important dans le fonds du flotteur (comme dans les portes roulantes et un grand volume de carène.

Lorsque G se trouve au-dessus de C , on peut encore réaliser une stabilité relative, dite stabilité de forme qui est celle de la plupart des navires. Elle est réalisée si le métacentre M correspondant à la droite d'intersection



des deux plans de flottaison se trouve au-dessus du centre de gravité. Le métacentre est déterminé par le vecteur vertical $\rho = CM = \frac{I}{V}$ porté vers le haut, V étant le volume de carène et I le moment d'inertie de la surface de flottaison. Le métacentre est d'ailleurs le point d'intersection des lignes de poussée pour des flottaisons isocarènes infiniment voisines ou, en d'autres termes, le métacentre est le centre instantané de rotation des flottaisons isocarènes. Pour que l'équilibre du flotteur soit stable, il faut que le plus bas métacentre satisfasse à la condition précédente; c'est $r = \frac{I_{min}}{V}$ correspondant à l'axe minimum du V flotteur. En désignant g C par a , il faut donc $r - a > 0$. Si la rotation s'effectue autour de l'axe longitudinal, le moment élémentaire des poids est $-Pa d\theta = -\Delta Va d\theta$ et le

moment élémentaire des formes est $\Delta I_m d\theta$.

Le travail de déviation est

$d\mathcal{E} = \frac{d\theta^2}{2} (-Pa + \Delta I_{min.}) = \frac{\rho d\theta^2}{2} (r - a) > 0$. La stabilité statique est d'autant plus grande que $(r - a)$ est plus grand.

En eau calme, si le flotteur a été écarté accidentellement de sa position d'équilibre, il exécute des oscillations de part et d'autre de cette position lorsqu'il est abandonné à lui-même. Le frottement sur la coque amortit ces oscillations et les arrête finalement. Le phénomène constitue le roulis. Pour les petites oscillations, en négligeant l'amortissement, la demi-période est

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} = \pi \sqrt{\frac{I_m}{gP(r-a)}}$$

$$l = \frac{K^2}{(r-a)} = \frac{I_m}{P(r-a)}$$

K étant le rayon de gyration de la masse par rapport à l'axe central parallèle à l'axe de rotation (axe longitudinal) c'est donc comme si le flotteur constituait un pendule simple de longueur l . Pour ralentir les oscillations (stabilité de roulis ou dynamique), il faut augmenter I_m et réduire $(r-a)$ donc il faut éloigner les masses du centre de gravité et réduire la surface de flottaison. Si le métacentre est au centre de gravité, la période devient infinie ; il n'y a plus d'oscillation. A la limite, dans le cas du sous-marin, $r=0$; il faut alors que a soit positif (stabilité de poids).

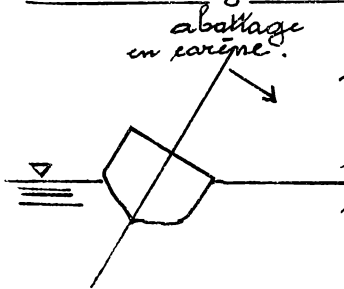
Donc si l'équilibre statique exige de grandes valeurs de $(r-a)$, donc de grandes surfaces de flottaison (pontons plats, caissons, docks flottants), l'équilibre dynamique exige par contre une grande inertie du flotteur, mais une faible surface de flottaison (bateaux-phares, bouées)

La période des oscillations finies non amorties est sensiblement la même que celle des petites. Observons que les facteurs d'amortissement augmentent la stabilité au roulis. On les augmente par les quilles de roulis, nervures sail lantes longitudinales fixées sur les carènes et qui s'opposent au roulis par réaction directe de l'eau. Il existe des dispositifs mécaniques anti-roulis, basés notamment sur l'effet gyroscopique. Le phénomène du roulis réel, notamment en eau agitée est extrêmement complexe ; les notions précédentes donnent cependant un aperçu des conditions du problème.

Le poids du flotteur est souvent constitué partiellement de lest, souvent liquide (water-ballast) par suite des facilités de chargement et de déchargement. Le lest a par contre un inconvénient grave, sa mobilité. Les déplacements de lest, par suite d'oscillations, peuvent entraîner le chavirement du flotteur. Le lest liquide doit donc être toujours subdivisé en compartiments cloisonnés assez petits pour éviter les dangers précités.

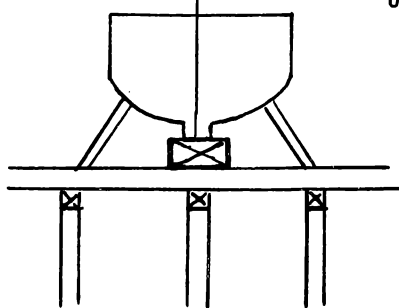
2 Divers modes de radoubage. Le radoubage consiste en la mise à sec des bâtiments en vue de visiter ou de réparer la coque.

L'abattage en carène consiste à amarrer le bateau près d'un appon-



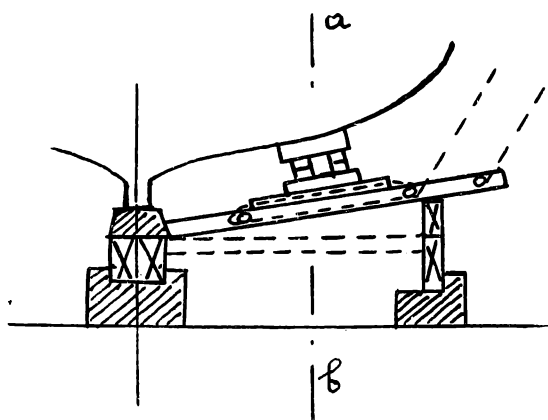
tement ou ponton, et à l'incliner en exerçant une traction oblique au sommet de la mâture par des haubans et des bœufs. La bande donnée au navire a pour effet de découvrir une partie de la coque. Cette méthode, sommaire, qui fatigue la mâture et la coque et crée des risques de chavirement, ne convient qu'aux petites embarcations non pontées.

Le gril de carénage consiste en un gril de charpente ou de béton armé établi dans les ports à marée à un niveau moyen entre M.H et M.B. Les embarcations à faible tirant d'eau y ont accès à M.H. et s'échouent à M.B. On peut alors procéder aux réparations. Le dispositif est très économique et convient bien aux ports de pêche. Les bateaux sont maintenus par des itançons ou s'appuient contre des appontements ou dues d'Albe portées de bornes d'amarrage et éventuellement d'engins de maintenance. Le gril de carénage doit être dans un endroit très abrité. L'inconvénient est que le travail, interrompu à chaque marée, est divisé en pose d'une fraction de marée (3h. au moins)

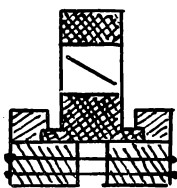


de marée (3h. au moins)

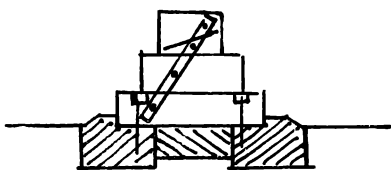
Avec la cale de halage ou slipway, le bateau est retiré de l'eau, indépendamment du niveau de marée, par gravissement d'un plan incliné sur un chariot spécial, appelé bor ou bureau, roulant ou glissant. Lorsque la translation du bateau se fait dans le sens de la longueur, la cale est dite longitudinale; elle est perpendiculaire au quai. Lorsque la translation est dans le sens de la largeur, la cale est dite transversale; elle est parallèle au quai. Ces cales sont généralement aménagées dans des renfoncements ménagés dans les caisses des quais. Elles comportent une partie fixe formée pour les cales longitudinales, de trois longorons, parallèles, posés sur le radier ou sur des palées de pilotis, dans ce cas convenablement contreventées. Les longorons portent trois longrines parallèles de glissement ou de roulement (couette) ou des rails. Le bor comporte également trois forts longorons, réunis par des traverses et contreventés et en outre, éventuellement, un ou deux plans de charpente latéraux en élévation. Le bateau repose sur le bor par une forte pièce de bois tendre (petites cales) ou par une ligne de tins (voir plus loin)



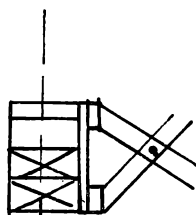
coupe a b dans les coins-ventrières



tins en bois



Élévation



coupe transversale

des traverses et contreventés et en outre, éventuellement, un ou deux plans de charpente latéraux en élévation. Le bateau repose sur le bor par une forte pièce de bois tendre (petites cales) ou par une ligne de tins (voir plus loin)

llements ménagés dans les caisses des quais. Elles comportent une partie fixe formée pour les cales longitudinales, de trois longorons, parallèles, posés sur le radier ou sur des palées de pilotis, dans ce cas convenablement contreventées. Les longorons portent trois longrines parallèles de glissement ou de roulement (couette) ou des rails. Le bor comporte également trois forts longorons, réunis par

L'accorage se fait par des coins - ventrières glissant sur les traverses, ou par des lignes de tins latéraux. La manoeuvre se fait par chaînes.

Les cales transversales présentent un grand nombre de longrines parallèles (42 à Rouen); elles portent des rails. Le ber reproduit la même disposition et ne peut avoir qu'un pan de charpente latérale, vers le haut. La manoeuvre se fait par un grand nombre de treuils enroulés sur des treuils commandés par un seul arbre ou une vis sans fin. Un appareil compensateur (notamment du système Labal) est interposé entre les chaînes et le ber. Le roulement se fait sur des trains de galets, disposés comme dans les vannes Stoney.

Les pentes sont pour un ber glissant	Cale long.	Cale transv.
	ber roulant	
	7 à 9%	30%
	5 à 6%	20%

Le ber d'une cale longitudinale présente généralement une pente un peu inférieure à celle de la cale 3%, pour faciliter l'échouage. La manoeuvre est délicate avec les cales longitudinales, et plus simple avec les cales transversales. Cette opération se fait dans l'avant-cale, qui doit atteindre la profondeur d'échouage et est assez longue dans les cales longitudinales. Le tonnage moyen est de 1000 à 2000 tonnes; on a fait des cales pour navires de 5000 tonnes.

Les cales de construction des grands navires ressemblent aux cales de halage longitudinales. On se sert aussi de dispositifs analogues pour la mise à l'eau et la sortie des canots de sauvetage, qui sont garés en temps ordinaire. Les cales, quel que soit leur usage, doivent toujours être établies dans des endroits abrités. On commet une erreur de principe en établissant un slipway dans un chenal de port en relation directe avec la mer, par exemple pour le service d'un canot de sauvetage. La manoeuvre se faisant d'ordinaire par mer démontée, le bateau court le plus grand risque d'être brisé. Avec les élévateurs, on a voulu parer à un inconvénient des cales de halage, provenant de leur grand développement. L'élévateur de Victoria Dock à Londres, du système Edwin Clarke, comporte deux rangées de presses hydrauliques verticales jumelées en tête par des traverses. Sur ces traverses repose un ponton qui peut flotter et que l'on peut échouer par tout liquide. L'élévateur dessert plusieurs pontons.

Le ponton étant échoué à fond de course des presses, le bateau est amené dessus, accoré, puis soulevé. Le ponton est épuisé et flotte alors librement avec le bateau à sec. On répare sur le ponton flottant amené dans un bassin spécial peu profond. Cette application est unique jusqu'à présent, mais le progrès des engins de levage puissants laisse entrevoir de grandes possibilités d'avenir pour des élévateurs hydrauliques ou funiculaires, notamment pour de petits bâtiments: chaloupes, etc. Pour les grands navires, les moyens de radoubage éprouvés sont les cales sèches et les docks flottants.

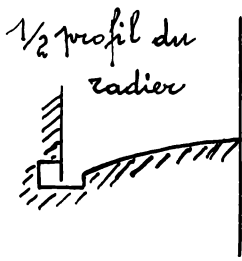
9. Cales sèches. Une cale sèche constitue une écluse maritime à grand sas, sans mur de chute, et pouvant seulement d'une tête de navire y entrer à flot; ensuite on ferme l'écluse et on épuise l'eau de la cale; le navire s'échoue d'une manière convenable et est réparé à sec. Les opérations inverses permettent de le remettre à flot et de l'extraire de la cale. Les parties essentielles d'une cale sèche sont donc l'écluse d'accès, analogue à une tête d'écluse maritime, mais à porte de flot seulement, et ensuite la cale. Celle-ci est analogue à un sas, mais fermée à l'extrémité opposée à la tête par un mur, formant un plan rectangulaire, en demi-cercle ou en ogive. Les dernières formes réduisent le cube de maçonnerie et l'épuisement; la première s'emploie pour réserver la possibilité d'allongement (*). Mais, différant des écluses maritimes, les cales sèches doivent avoir tout leur radier étanche et susceptible de résister aux sous-pressions. L'étude de la stabilité des cales sèches est donc analogue à celle des sas d'écluses à radier rigide, exposée dans le cours d'écluses, avec la différence toutefois que lorsque la cale est à sec, le radier supporte en son milieu tout le poids du navire. Donc, lorsque la cale est à sec, le radier est, en toute hypothèse, soumis à flexion. Le poids excentrique des bajoyers tend à compenser le moment fléchissant dans la partie centrale, provenant de la surcharge concentrée du bateau. Si des accidents survenus aux anciennes cales construites sur radier général non armé (forme de radoub de Gand) ont pu justifier la séparation des bajoyers du radier, la solution moderne paraît bien être celle du radier rigide en béton armé. La forme des bajoyers en béton armé peut être déterminée de telle sorte que les poids et poussées correspondent, en envisageant tous les cas de sollicitation possible, aux moindres contraintes. En terrain meuble et perméable, les radiers sont très épais et souvent plus dans l'axe qu'aux bords. En terrain imperméable, et à profondeur suffisante dans le roc, le radier peut être un simple revêtement égalisateur. C'est là un cas exceptionnellement favorable. Les radiers minces sont divisés par des drains en relation avec les aqueducs d'épuisement.

En terrain meuble et perméable, la sollicitation du radier dépend essentiellement de la répartition des sous-pressions et des réactions du terrain. C'est là une question encore pour ainsi dire inconnue et très complexe. D'investigations théoriques (Bousinesq) et expérimentales (écluse d'Ymuiden), il résulte que la répartition des pressions n'est pas uniforme, et au contact du navire, il semble que la pression soit supérieure au milieu que vers les bords, ce qui réduit la flexion réelle du radier sous la charge du navire.

Le parement intérieure des bajoyers est à grands gradins, produisant un évasement général, en vue de l'accès de l'air et de la lumière. Les

(*) On a réalisé en Angleterre quelques cales sèches à deux têtes accessibles par les deux extrémités. Gilbey Dock à Londres, Portsmouth, etc.....

gradins servent en même temps à l'accotage du bateau au moyen d'épontelles (pièces de bois) et à la circulation des ouvriers. Les pavements des bajoyers contiennent des organesaux, des escaliers (le plus souvent parallèles aux pavements) et des glissières. Les dernières sont des rigoles inclinées à $2,5/2$ ou $3/2$, destinées à la descente des matériaux. Elles sont généralement normales aux pavements et voûtées pour éviter l'interception des courants pleins et chemins de circulation. Dans les grandes formes, elles sont bordées d'escaliers de part et d'autre. On en dispose plusieurs se faisant vis-à-vis dans les bajoyers, et souvent une au fond, suivant l'axe longitudinal. Le radier est horizontal ou à très faible pente vers la tête dans le sens longitudinal.



Transversalement, il est en dos d'âne, les rigoles latérales au pied des bajoyers étant en relation avec les aqueducs d'épuisement. Les formes sont établies de préférence en des endroits bien abrités, dans les bassins à flot, et groupés, de manière à former un vaste chantier. On en dispose parfois dans les avant-ports, dans des endroits

bien abrités, pour recevoir sans délai les navires très avoués (ports de guerre). La longueur totale des formes de radoub doit être proportionnée à l'importance du port (15 à 120 m. linéaires par Km. de quai; en moyenne 50 à 75.) Les dimensions des formes n'ont cessé de croître; la dernière forme du Havre mesure 300 m. de longueur utile (allongeable à 350), 36 m. de largeur au plafond, 15,85 m. de profondeur d'eau sur le seuil en vive eau, 13,60 m. en morte eau. Le cube d'eau en vive eau est 233.000 m³. King Georges V Dock (Londres): Long. 228 m, larg. 30, 48, mouillages sur les tins 10, 70.

La construction se fait par les méthodes indiquées dans les cours d'édifices et de fondations. Les méthodes modernes, applicables selon les cas, sont:

- 1° le caisson unique à air comprimé (forme n° 7 du Havre) ou les caissons jointifs à air comprimé; la charpente des caissons constituant l'armature du radier;
- 2° la construction à sec dans une fouille épuisée par puits filtrants;
- 3° les caissons en béton armé échoués (projet pour le port de Ladix)

4 Dispositifs d'exploitation des cales sèches. Le navire repose sur le radier de la cale sèche par l'intermédiaire de tins, appuyés spéciaux alignés en files suivant l'axe longitudinal et sur lesquels descend la quille du bateau. Les tins sont formés de pièces de bois superposées ou d'éléments en fonte ou acier coulé,

dont certains sont en forme de coins, pour permettre le réglage de la hauteur. On emploie aussi des dais en maçonnerie ou en béton armé. Sur les tins, il y a généralement des faux-tins, en bois dur (chêne) portant à

Leur tour des pièces en bois tendres (couettes) destinées à l'usage et facilement remplaçables. Les tins se placent transversalement ; leur hauteur varie de 1,00 à 1,20 m. la largeur de 0,35 à 0,40 m. ; la longueur, de 1,20 à 1,50 m. L'écartement est réglé selon le poids linéaire variable des navires. Il est maximum sous les chaudières et y atteint 100 à 200 t/m pour des paquebots de 150 à 200 m. Pour les plus grands paquebots de 300 m., on a envisagé au Havre jusqu'à 500 ou 600 t/m et des tins en acier coulé pour 900 tonnes.

Le réglage de l'appui du bateau sur les tins est complexe et délicat ; leur écrasement peut provoquer des flexions et des fatigues importantes dans la coque, même des ruptures. En cas de besoin, les tins sont posés jointivement. Pour l'accoragage des bateaux à fond très plat (cuirassés), on établit parfois deux lignes latérales de tins auxiliaires ; mais pour les navires commerciaux, on préfère généralement l'emploi d'épontilles.

Les formes de radoub sont équipées de voies forcées et de grues, desservant toute la surface de la cale, du type à treuille et cantilever, en usage dans les chantiers navals.

Dans les anciennes formes, on trouvait près de l'entrée une fosse, de 3 à 4 m. dite fosse à gouvernail, qui servait à retirer le gouvernail par le bas. Cette fosse était un point faible, et actuellement, les gouvernails sont construits de façon à pouvoir être retirés par translation horizontale.

Le problème du remplissage des cales sèches est analogue à celui des écluses ; il en diffère par l'importance des volumes et par la particularité que la forme est initialement sèche. Les aqueducs doivent déboucher le plus bas possible, au niveau du radier. Initialement, le levage des vannes doit être partiel, pour diminuer le débit tant que les débouchés ne sont pas noyés. Sinon, il se produirait des jets d'eau violents, animés de vitesses de 10 à 12,50 m. par seconde, qui détruiraient les maçonneries et produiraient des désordres. On cherche d'ailleurs à amortir la force vive de la veine dans des chambres d'épanouissement. On peut employer d'une manière appropriée les dispositifs usuels des écluses ; aqueducs courts, aqueducs longs et larçons ventelles et siphons. Les formules fondamentales pour la durée de remplissage sont les mêmes que pour les écluses : $Q = M \Omega \sqrt{2gh}$ et $S dh = Q dt$.

D'après M. Flamant,
$$M = \frac{1}{\sqrt{8 \frac{L}{D} \epsilon, g + (\frac{1}{m} - 1) + \frac{10}{g}}}$$
,

L étant la longueur de l'aqueduc, D le quadruple du rayon moyen, m le coefficient de contraction (0,62 environ) ; ϵ , le coefficient de frottement des parois (0,0035 environ) Dans un bassin à marée, du fait de la variation du niveau amont, l'équation différentielle n'est pas intégrable et l'on procède par la méthode des différences finies, de préférence par voie graphique.

La durée de remplissage de la forme n° 7 du Bâvre est de 1 heure environ. Le débit maximum atteint environ $96 \text{ m}^3/\text{sec}$.

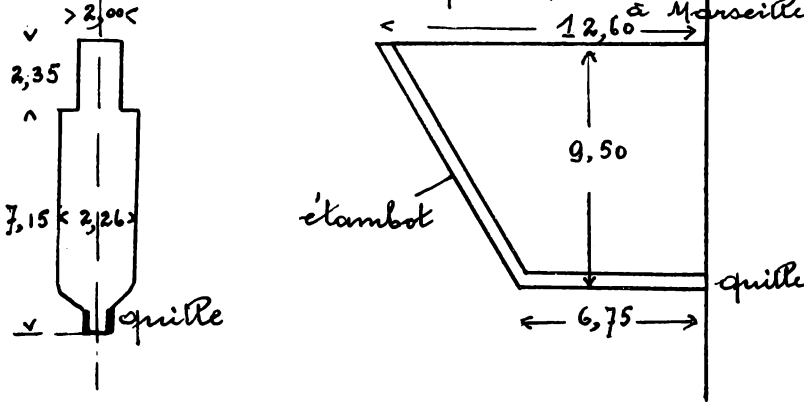
Pour l'épuisement, les rigoles d'assèchement qui longent les bajoyers communiquent par des conduits ou larviers avec les aqueducs d'épuisement, qui conduisent les eaux vers un puisard, où plongent les tubes d'aspiration des pompes (Au Bâvre, il y a un puisard dans chaque bajoyer). Les aqueducs longitudinaux peuvent éventuellement être employés aussi pour le remplissage. Les aqueducs de vidange doivent avoir comme les aqueducs de remplissage de bonnes caractéristiques hydrauliques, c'est-à-dire des formes continues et progressives; en outre, il faut éviter les poches d'air possibles. Les pompes de refoulement dans des aqueducs de refoulement, généralement plus petits et débouchant sous le niveau des basses mers. Les vitesses usuelles réalisées sont de $1 \text{ m}/\text{sec}$. La durée d'assèchement est donc généralement plus grande que celle de remplissage et de l'ordre de 4 à 5 h. en France, la moitié en Angleterre. On emploie des pompes centrifuges, placées dans des fosses étanches, de manière à travailler avec une aspiration maximum de 4 à 5 m. Au début, elles sont en charge; l'amorçage est donc immédiat et certain. A cause de la forte charge initiale et pour réduire le développement de la chambre étanche des pompes au-dessus du puisard, on emploie fréquemment le type centrifuge à axe vertical relié par long arbre à un moteur électrique à axe vertical placé dans une chambre de machines dont le plancher est au-dessus de + H.M. Cependant les pompes centrifuges à axe horizontal et à attaque directe, sont plus robustes, plus simples et plus sûres en exploitation. La force motrice est généralement électrique, de préférence par courant continu.

A côté des pompes d'épuisement proprement dites (5 de 1000 CV à la forme Gladstone, de Liverpool; 8 de 495 CV au Bâvre), on prévoit souvent des pompes d'entretien (4 de 100 CV au Bâvre) pour maintenir la cale sèche malgré les infiltrations. La crépine est placée en contrebas de celle de l'épuisement, pour tenir les aqueducs secs, et permettre l'accès des dispositifs spéciaux.

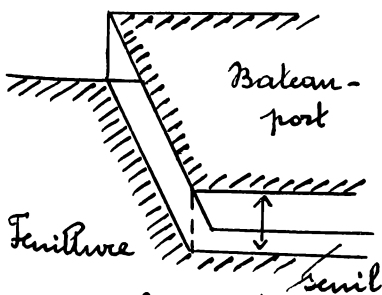
Les têtes sont conditionnées comme les têtes d'écluses maritimes. On emploie parfois comme bouchure les portes luquies (petites formes) et les portes roulantes (grandes formes) Mais la bouchure qui est encore la plus usitée est le bateau-porte, échoué contre des fruitures latérales, garnies de fourreaux d'étanchéité. L'élévation est souvent légèrement trapézoïdale pour faciliter le déjagement de la porte par un léger soulèvement lorsqu'elle est rendue flottante. Le pivotement est facilité de même par des aisances ménagées dans le bajoyer.

5/Bateaux - portes — Les bateaux - portes sont constitués par des flotteurs symétriques que l'on échoue en travers de l'entrée de la cale, contre des appuis adhésifs. Lorsqu'on épuise la forme, la pression extérieure de l'eau pousse la porte sur ses appuis; elle travaille comme une porte à un vantail ou une porte roulante. L'ouverture et la fermeture se font par déplacement flottant. Les bateaux - portes sont disposés pour faciliter ces manœuvres; on leur donne même des formes effilées, avec deux étambots d'extrémités, assurant l'appui sur les feuillures et une quille d'appui sur le seuil. Cependant, comme la porte doit résister, après épuisement de la cale, comme une énorme plaque fléchie, ce profil est peu favorable et dans les dernières portes, on réalise la forme parallélépipédique analogue à celle des portes roulantes. Au point de vue de la résistance et de la constitution, l'analogie est complète avec les portes roulantes: traverses principales et aiguilles, double bordage, lest fixe inférieur, caisson flotteur étanche, compartiment supérieur où l'eau peut jouer librement. Il y a plusieurs ponts, celui du caisson flotteur inférieur étant appelé pont de ressant. Le pont supérieur porte les organes de manœuvre, cabines, machines, pompes, etc. Des cheminées permettent les accès aux compartiments inférieurs.

Schema d'un bateau - porte (Cale - sèche n° 1 à Marseille)

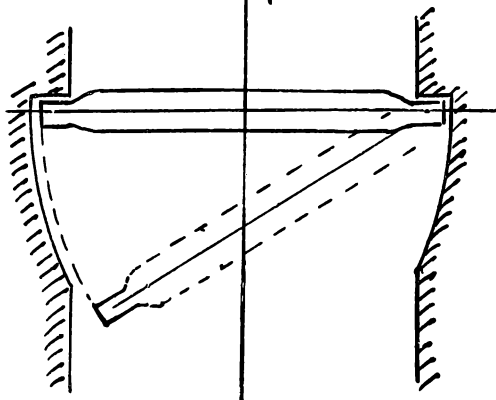


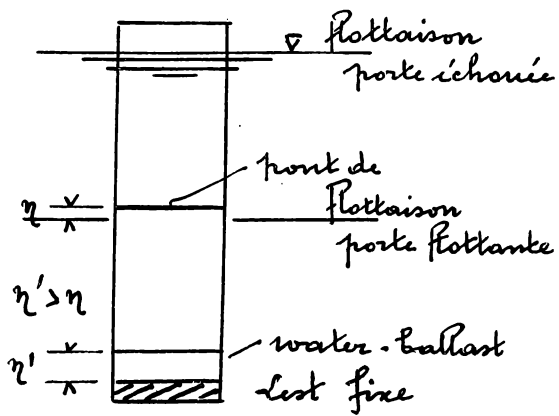
La manœuvre d'échouage des bateaux - portes demande une étude approfondie. On donne à ces engins de la stabilité de poids. Il faut que l'échouage soit rapide et cependant sans brutalité. Lors du remplissage de la cale, vers la fin, la pression appliquant la porte sur les appuis disparaît; il faut éviter que la porte ne se souleve alors brusquement avant l'égalisation des niveaux, pour éviter les contrecoups défavorables pour le navire en cale sèche et pour le bateau - porte qui pourraient en résulter. Or, comme les niveaux sont variables, même dans les bassins à flot, on voit la complexité



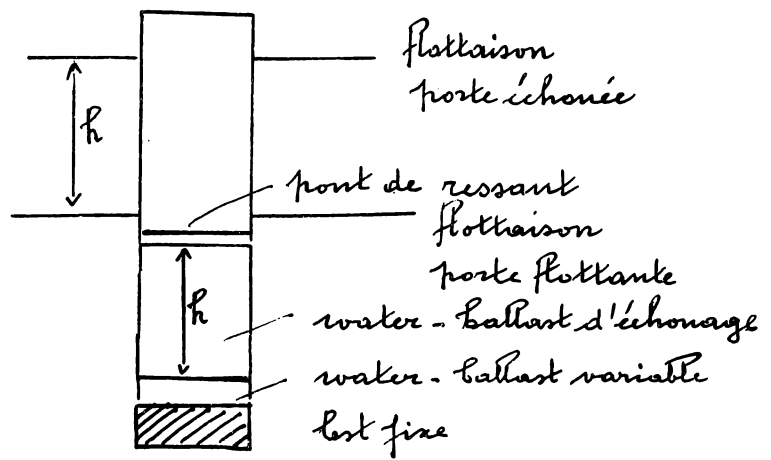
Souèvement du Bateau - porte pour son dégagement de l'écluse.

Évolution du Bateau - porte.





Schema du bateau - porte à flottaison fixe



du problème, qui ne peut être résolu avec un lest constant fixe et une flottaison constante. La solution appropriée a été proposée par M. Guffant, par la flottaison variable. Elle consiste à obtenir les communications du compartiment supérieur avec la mer et à envoyer toute l'eau correspondant à une flottaison déterminée dans le bassin flottant. L'échouage est ainsi gradué comme on veut. Pour le soulèvement, on laisse écouler d'avance dans la cale sèche la quantité d'eau voulue pour que la porte se soulève d'elle-même d'une quantité très modérée lorsque l'eau atteindra dans la cale un niveau bien déterminé et voisin du niveau extérieur. Des pompes électriques puissantes peuvent contribuer à l'opération et permettre tel réglage que l'on veut. Si d'ailleurs la mise à flot se fait en vives eaux, le lest conservé sera supérieur à celui d'un échouage ultérieur en mortes eaux; il faudra assurer l'épuisement de l'excédent par pompage. La position du ponton de ressort devient indifférente et il peut même disparaître.

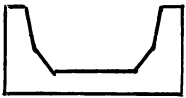
Ainsi équipés, les bateaux-portes deviennent des engins de manoeuvre assez aisés et sûrs. Ils ont l'avantage d'être réversibles et ainsi on peut les entretenir et réparer, sur chaque face successivement, de l'intérieur de la cale sèche. Ils n'exigent pas de chambre de porte. Cependant, pour faciliter la manoeuvre de la porte n° 7 du bûvre, on les fait retirer par un perruis latéral à portes d'îbe, comme des portes roulantes, mais en flottant.

6 Docks flottants. Les docks flottants sont des engins de radoub établis suivant un autre principe. Ils sont très complexes et leur construction est du ressort de l'ingénieur naval. Ils sont moins répandus que les cales sèches, bien que les progrès de la construction navale, de la mécanique et de l'électricité semblent devoir développer leur emploi.

En principe, un dock flottant est un flotteur dont la section transversale est semblable à celle d'une cale sèche, mais formée de caissons creux entre un double bordage étanche. On distingue le ponton ou caisson

influvient et les caissons latéraux. Un test d'eau permet d'immerger le dock presque jusqu'au pont supérieur. Dans cette position, on peut y introduire un navire, qui est accoré, éventuellement, avec le concours de scaphandriers. On pompe alors le test d'eau; le dock émerge en soulevant le navire qui repose sur une ligne de tins. Le déplacement du ponton doit être tel que son plancher émerge, malgré la charge du navire supporté. Celui-ci est alors à sec et peut être réparé, par les moyens du deck flottant, qui constitue une véritable usine-atelier; soit avec le secours d'ateliers terrestres à proximité du poste de travail du dock. Parfois, on se borne aux réparations de premières nécessité, la mise en état complète se faisant ensuite en cale sèche.

Une première question capitale est celle de la stabilité du dock, qui ne peut être qu'une stabilité de formes. Elle est grande, d'ailleurs par suite de la surface de flottaison rectangulaire large. Cependant, avant l'immersion du ponton, la section de flottaison ne comporte que les rectangles étroits des caissons latéraux. La stabilité est la plus précaire peu avant l'immersion du ponton. On l'améliore en raccordant les caissons latéraux au ponton par des épaulements obliques.

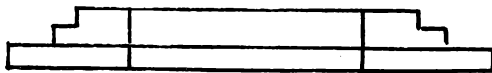


Un autre élément est la résistance du dock. La puissance élévatrice verticale est uniformément répartie sur toute la longueur. Le poids du navire a au contraire une répartition linéaire constante. Il en résulte un diagramme d'efforts tranchants et de moments fléchissants faciles à établir et auxquels la charpente doit résister. On doit envisager de même la résistance transversale.

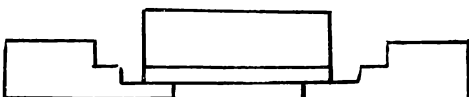
Les docks flottants conviennent bien aux colonies; ils peuvent être construits dans la métropole et remorqués ensuite à leur port d'attache éloigné. Le poids est d'environ 45% de la puissance de levage, pour laquelle on atteint et dépasse 50.000 tonnes (> 200 m. de long et 50 m. de large.)

Les docks modernes sont généralement auto-carénants (self-docking). A cet effet, ils sont divisés en tronçons accolés de différentes manières.

Dock à trois sections boulonnées.



auto-carénage

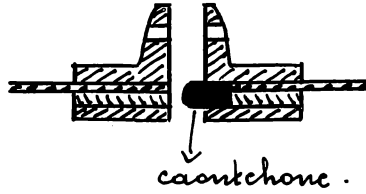


res. Ils sont assemblés en temps ordinaires d'une manière aussi rigide que possible, mais en cas de besoin, chaque tronçon peut être caréné par le moyen des autres. L'inconvénient de la division est la diminution, tant en vue de la tenue à la mer que de la résistance sous l'effet des vaisseaux lourds les plus défavorablement chargés (cuirassés)

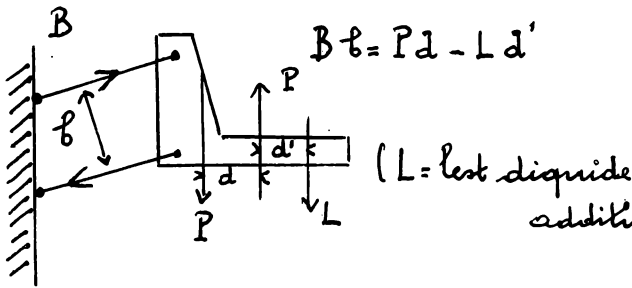
Cet inconvénient est tel qu'on a une tendance à revenir au dock non sectionné et qu'en tout cas le type le plus répandu aujourd'hui est celui à trois sections, une centrale grande, deux latérales plus petites, solidement assemblées entre elles par des boulons assurant une liaison rigide et résistante. Les caissons latéraux portent des grues mobiles et sont reliés par des passerelles mobiles cantilever à axe vertical.

Pour les petits bâtiments, on a proposé en Allemagne des docks flottants

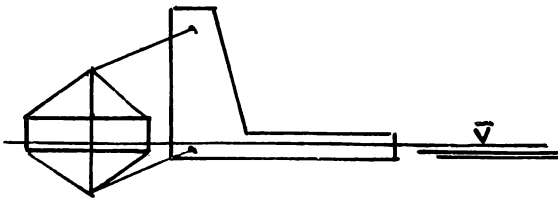
Joint d'un dock
à sections
boulonnées



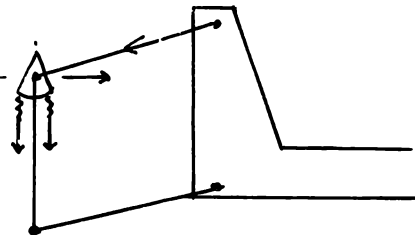
partiellement à claire voie et les docks-gigogne permettant, comme l'élevateur de Clarke, de mettre les navires à sec sur des pontons ou docks flottants sans machinerie, un dock desservant plusieurs pontons. Je renvoie, pour plus de détails aux ouvrages spéciaux.



On construit aussi des docks flottants dissymétriques, à caisson monolatéral. En immersion, ils tendent donc à s'incliner. On s'y oppose en guidant les mouvements du caisson par un parallélogramme articulé dont les bielles sont fixées à des piles fixes près du rivage, ou à des pylônes fixés sur des pontons auxiliaires très stables, ce qui diminue l'inclinaison, sans la supprimer. Les efforts d'équilibre transmis par les bielles produisent les moments sollicitants dans les sections transversales. Pour les réduire, on a imaginé des dis-



Secteur oscillant commandant les pompes de testage d'après l'effort B transmis par la tringle (Syst. Clarke)



positifs assurant un testage liquide automatique du côté opposé à l'inclinaison, par action des bielles de guidage sur des leviers (p. ex. système Clarke) les docks peuvent être éventuellement auto-corrigeants. En outre, ceux à ponton auxiliaire peuvent être transférants, c'est-à-dire disposer les caissons sur des grils en dents de peigne, dans lesquels pénètrent les pontons divisés du dock flottant.

7. Comparaison entre les cales sèches et les docks flottants - Les premières ont l'avantage des installations fixes et durables, permettant un travail

plus normal et plus soignés. Les dépenses d'établissement plus élevées peuvent être compensées par la durabilité et l'économie de l'exploitation et d'entretien. La sûreté d'exploitation est grande et les profondeurs ordinaires suffisent. Mais la construction exige un terrain assez bon. Les docks flottants coûtent moins et sont d'iciation plus rapide; par contre, ils sont moins durables et coûteux d'entretien et d'exploitation. Ils exigent une surprofondeur importante pour pouvoir soulever les plus gros navires. Par contre, ils sont mobiles et peuvent aller chercher les navires immobilisés par leurs avaries, même dans des positions dangereuses. Grâce à leur cloisonnement, les docks flottants sont des engins assez souples, permettant de faire face à des situations exceptionnelles (marine de guerre). Ils sont indépendants du terrain. Les docks flottants se justifient surtout dans les colonies, dans les ports naturellement très profonds et ceux dont le terrain est très mauvais, ainsi que dans les ports militaires.

Chapitre VII

Éclairage et balisage des côtes.

1. Généralités. La navigation se fait en pleine mer d'après des observations astronomiques, mais par suite des courants, etc. Le navire peut subir des déviations atteignant 10 milles par jour. Des erreurs de cet ordre sont dangereuses au voisinage des côtes, par suite des hauts fonds, des récifs, des courants, etc. En outre, elles peuvent éloigner le navire du point d'atterrissage prescrit. Dans le jour, les navigateurs peuvent se guider d'après l'aspect des côtes, dont les longues étendues uniformes peuvent recevoir des repères optiques: grands panneaux blancs ou colorés appelés amers. En tous temps, les sondages peuvent renseigner sur la route, mais ils exigent une navigation lente. C'est néanmoins le moyen le plus sûr en temps de brume et la nuit en l'absence de signaux lumineux. Les signaux sonores de brume ont une faible portée. Les signaux ultra-sonores et les ondes hertziennes (radiophares) sont susceptibles d'apporter des solutions perfectionnées. Actuellement, les dispositifs les plus importants sont destinés à la signalisation lumineuse pendant la nuit; les dispositifs principaux sont les phares.

Les derniers, pourvus d'appareils lumineux puissants et à grande portée, sont placés en des points favorables par rapport aux grandes routes maritimes. Ce sont donc des repères de 1^{er} ordre, qui peuvent être très éloignés entre eux ou entre groupes. Il existe des routes dont la disposition par rapport aux côtes exige une suite continue de phares, à des distances telles que l'un soit en vue avant que l'autre disparaisse (Par exemple, la Manche et la Mer du Nord.)

Les phares d'atterrissage permettent aux navires de reconnaître leur position ; l'accès aux rades et ports est ensuite signalé par des feux secondaires, des balises et bouées, dont l'ensemble constitue le balisage des côtes. Il s'y ajoute des signaux conventionnels d'administration des ports, par exemple les signaux sémaphoriques d'indication des profondeurs, etc.

On distingue : 1° les feux fixes a) d'horizon qui éclairent uniformément la majeure partie de l'horizon maritime. Leur puissance est faible.

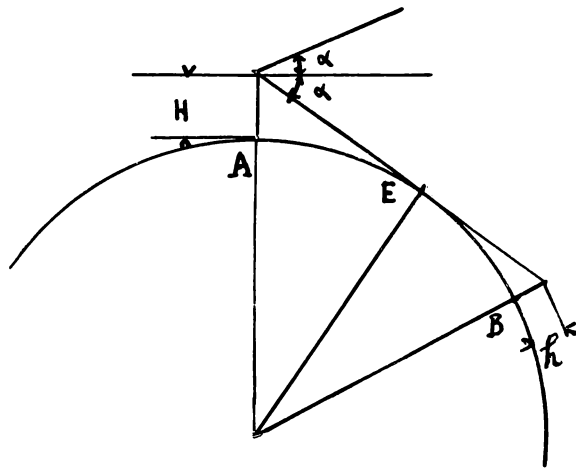
b) de direction éclairant un secteur relativement étroit. Éventuellement plus puissants, ils peuvent se confondre avec les feux de navires. Les feux peuvent être blancs, rouges ou verts. Les feux blancs (d'horizon p. ex.) peuvent recevoir des secteurs colorés destinés à couvrir soit des passes, soit des obstacles. Les limites sont imprécises et comportent un angle d'indécision qu'il convient de placer dans l'angle non dangereux.

Les feux blancs fixes de direction peuvent former des feux d'alignement, en conjugant deux feux assez écartés placés suivant l'alignement à déterminer et à des niveaux différents. Malgré les imperfections optiques, la précision est suffisante.

2° les feux à occultation dont la lumière est périodiquement éclipcée pendant des temps relativement courts, par rotation d'un panneau opaque. Les occultations sont régulières (toutes les n'') ou groupées (un groupe toutes les n''). Les occultations peuvent se combiner avec les feux d'horizon ou de direction et les feux colorés ; la puissance est du même ordre.

3° les feux mobiles ou à éclats, composés de faisceaux lumineux tournants, concentrés par des panneaux lenticulaires, donnant des éclats très vifs et courts, réguliers ou groupés, séparés par des intervalles plus longs. Actuellement, en France, les intervalles sont de 5" au maximum. La durée optimum des éclats serait $\frac{1}{4}$ de ", mais on est conduit à descendre en dessous, sans toutefois dépasser la limite inférieure de $\frac{1}{10}$ de ". La rapidité de rotation ne permet plus une reconnaissance sûre par la durée et l'intervalle des éclats ; les phares se distinguent maintenant par le groupement des éclats, qui sont toujours blancs. On peut aussi établir des petits feux de direction colorés à éclats. Les feux mobiles réalisent, pour la concentration des faisceaux, les plus grandes puissances lumineuses.

La portée géographique d'un phare A de hauteur H est définie par la distance AE au point E où un rayon lumineux est tangent à la surface de la mer calme. Le rayon lumineux est courbé par la réfraction. La portée lumineuse pour un observateur se trouvant à une hauteur h au dessus



du niveau de la mer est $AB > AE$. Pratiquement cette portée dépend de la puissance lumineuse et surtout de l'état de l'atmosphère. Elle n'est pas proportionnelle à la puissance et le bénéfice de portée des grandes puissances est d'autant moindre que le temps est plus brumeux. On détermine par expériences les portées lumineuses réalisées 90 fois sur 100 (temps brumeux) et 50 fois sur 100 (temps moyen) les dernières atteignent jusqu'à 40 milles

On admet que le rayon de courbure ρ de la trajectoire lumineuse égale m fois le rayon terrestre R . Dès lors la portée géographique est

$$AE = \sqrt{RH \frac{2m}{m-1}} = D$$

d'inclinaison α du rayon lumineux sur l'horizon est telle que

$$\log \alpha = \frac{m-1}{m} \frac{D}{R} ;$$

c'est le minimum de la demi-amplitude du faisceau lumineux.

L'observateur placé en B à hauteur h au-dessus du niveau de la mer verra théoriquement le feu si

$EB \leq \sqrt{Rh \frac{2m}{m-1}} = d$, la portée lumineuse théorique étant $D+d$. Le coefficient m varie sur les côtes françaises de 3 à 60 selon l'état de l'atmosphère, en moyenne 10 environ. En réalité, il n'y a pas intérêt à dépasser une hauteur H de 50 à 100 m., à cause des magies.

Par contre, les feux bas sont très souvent masqués par les brumes légères de surfaces.

Pour assurer la visibilité de jour des phares, on en blanchit généralement les tours. Les lois de la visibilité des objets en plein jour sont d'ailleurs mal connues.

Les signaux sonores ont des portées variables selon leur nature, de quelques centaines de mètres pour les cloches jusqu'à 6 milles en moyenne pour les puissantes sirènes. Mais la portée dépend fortement de l'état atmosphérique et peut varier de 2 à 18 milles pour un même signal. Les cloches sous-marines dont sont munis certains musoirs d'entrée de ports, des bouées et bateaux-phares permettent par réception microphonique, un repérage assez précis.

La question de la signalisation maritime doit son état actuel en majeure partie aux travaux remarquables des éminents ingénieurs français des Phares et Balises; la signalisation maritime française est exemplaire. Le traité "Phares et Signaux maritimes", de M. Ribière fait autorité dans la question.

2 Phares — Les phares sont des constructions élevées en forme de tour portant à la partie supérieure un appareil lumineux ou lanterne, en métaux inoxydables (Bronze, laiton, cuivre). La tour est en maçonnerie, béton armé ou charpente métallique. Elle comporte généralement une ou des galeries circulaires au niveau de la lanterne et une chambre de garde. Au pied du phare se trouvent les annexes: logements des gardiens, salle des machines, magasins, etc. dans des bâtiments séparés sur terre ferme, dans le socle même des phares isolés en mer sur des récifs.

Les phares sont soumis à l'effort du vent, de 275 kg/m^2 , rapporté à la section diamétrale dont on considère les $\frac{2}{3}$ en France, la $\frac{1}{2}$ en Angleterre. La stabilité est assurée par le poids propre. On peut donc effectuer les calculs statiques d'une telle construction de coefficient de sécurité au renversement à la base est pris égal à 5. Pour les maçonneries, on ne compte pas sur la résistance à la traction et on prescrit parfois qu'il y ait compression partout, ce qui paraît excessif. Mais on n'envisage ainsi qu'une sollicitation statique, alors que les expériences et les observations ont montré très nettement que les rafales, souvent rythmées, produisent des oscillations élastiques des phares. On a relevé des oscillations de 2 m/m d'amplitude totale et dont la période allait de $\frac{1}{2}$ à $\frac{8}{10}$ de ". En outre, certains phares en maçonnerie médiocre subissaient des flèches mesurables (4 mm) sous l'effet des fortes rafales. Les chiffres observés pour les vibrations sont compatibles avec ceux calculés par l'équation simplifiée de Lord Rayleigh pour les tiges vibrantes (voir Ribière, op. cité). L'énergie des oscillations d'une tour comporte: 1) l'énergie potentielle qui pour un élément de longueur dx et de section Ω est $\frac{1}{2} \left(\frac{M^2}{EI} + \frac{N^2}{E\Omega} \right) dx$; elle est nulle au sommet de la tour;

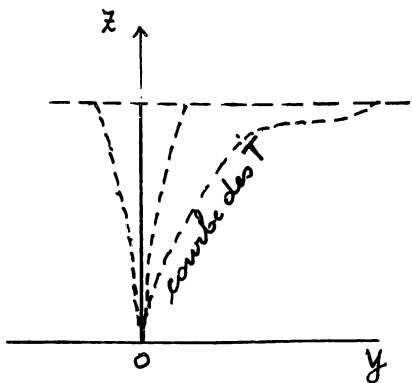
2) l'énergie cinétique, qui comporte deux termes, l'un de translation des sections perpendiculaires à l'axe, égal à

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta}{g} \Omega \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 dx, \text{ l'autre de rotation de ces sections}$$

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta}{g} L \left(\frac{d^2y}{dx dt} \right)^2 dx. \text{ Les deux termes sont nuls à}$$

la base (encastrement) et maxima au sommet. Donc les effets d'inertie produisent au sommet de la tour des fatigues d'autant plus sensibles que l'on y concentre la forte masse de la lanterne et que le volume de matériaux intéressés est réduit, par l'amincissement de la tour. On peut d'ailleurs, par résolution de l'équation des tiges vibrantes, trouver la loi des déplacements horizontaux, des vitesses et des accélérations $\frac{d^2y}{dt^2}$, d'où celle des forces $\frac{\Delta}{g} \Omega \frac{d^2y}{dt^2} dx$. On en déduit la courbe des T et des M correspondants.

Immédiatement sous la lanterne, on trouve des T assez considérables, qui expliquent les fissures verticales relevées au sommet des vieux phares et provenant d'efforts rasants. Elles s'amorceraient d'ailleurs aux angles



Enfin, les phares isolés en mer sur des récifs sont exposés au choc direct des vagues qui, en se brisant, peuvent lancer des projections verticales jusqu'à des hauteurs considérables. Nous avons essayé d'exposer dans le premier chapitre les éléments d'appréciation des efforts correspondants. Il est évident que de tels phares doivent recevoir un socle particulièrement solide, contenant d'ailleurs les annexes du phare. L'ancre-

ge de la fondation au roc doit être particulièrement soigné (rails d'ancrage) et toute la tour doit être spécialement robuste.

On peut déduire de ce qui précède les règles constructives suivantes.

Les phares doivent recevoir une fondation particulièrement solide, large, bien ancrée dans le sol, éventuellement sur pieux. La base de la tour ou socle réalise la transition entre l'empattement de fondation et le fût de la tour. On emploie de la maçonnerie de choix, au mortier de ciment.

Les planchers intermédiaires se feront de préférence en béton armé, ainsi que les escaliers et parois de refend. Éventuellement, on disposera des armatures au couronnement, notamment autour des baies. Complété par la galerie en surplomb, et la lanterne, les phares en maçonnerie constituent généralement des constructions très élégantes, dont les types français sont des modèles.

L'emploi de la maçonnerie de bonne qualité est avantageux par suite de la durabilité et de la grande masse, qui réduit les vibrations. Le béton armé est désavantageux à ce dernier point de vue, ainsi qu'en ce qui concerne l'aspect. Son emploi n'est cependant pas exclu, mais il faudrait essayer d'introduire dans le calcul de résistance l'effet des vibrations, dont les données sont encore sommaires. Par contre l'emploi de petits matériaux ou de béton est favorable pour la résistance aux chocs et vibrations. Des phares en charpente métallique, dont il existe quelques types, ont l'inconvénient de l'altérabilité et la sensibilité vibratoire; ils sont peu employés (sauf toutefois en Amérique, sur pieux à vis par les fonds de sable.)

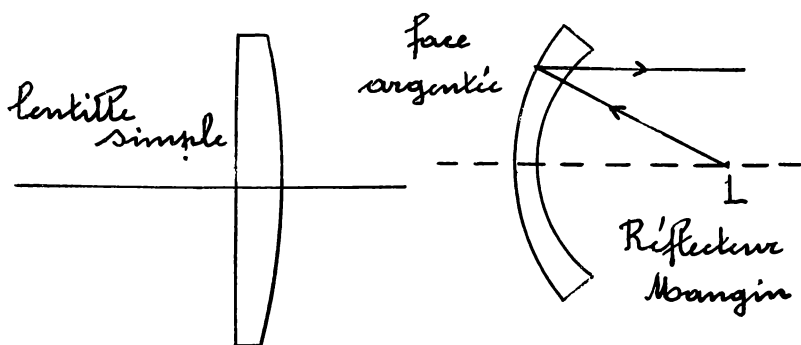
La construction des phares en terre ferme est analogue à celle des cheminées et se fait au moyen de planchers et grues-potences s'élevant avec la tour même. La construction en mer est par contre exposée aux difficultés les plus grandes; elle peut durer des dizaines d'années, environ 50 pour le phare de la Jument d'Quessant, près de Brest.

On utilise aussi en France les tours ou tourelles-Eolises, massifs cylindriques de maçonnerie pleins, peu élevés au-dessus de H.M. (5 à 15,00), portant des feux et signaux sombres non gardés. Le calcul leur assigne une

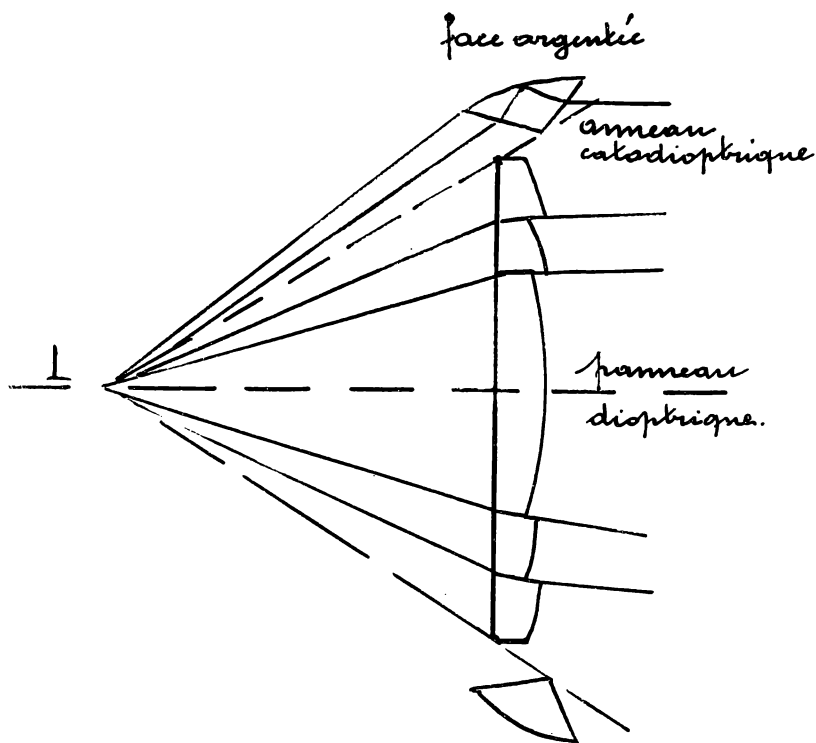
période propre de vibration de 0,10 à 0,20 seconde. Pas plus qu'avec les phares en mer, il n'y a donc de synchronisme à redouter avec les lames. Mais ces vibrations rapides peuvent influencer le fonctionnement des appareils de signalisation, qui doivent être éventuellement fixés sur des amortisseurs en caoutchouc. Le fonctionnement est automatique et réglé par des mouvements d'horlogerie. Sur les murs des jetés et digues, on dispose souvent les feux de direction sur de petites tourelles métalliques en tôle rivée.

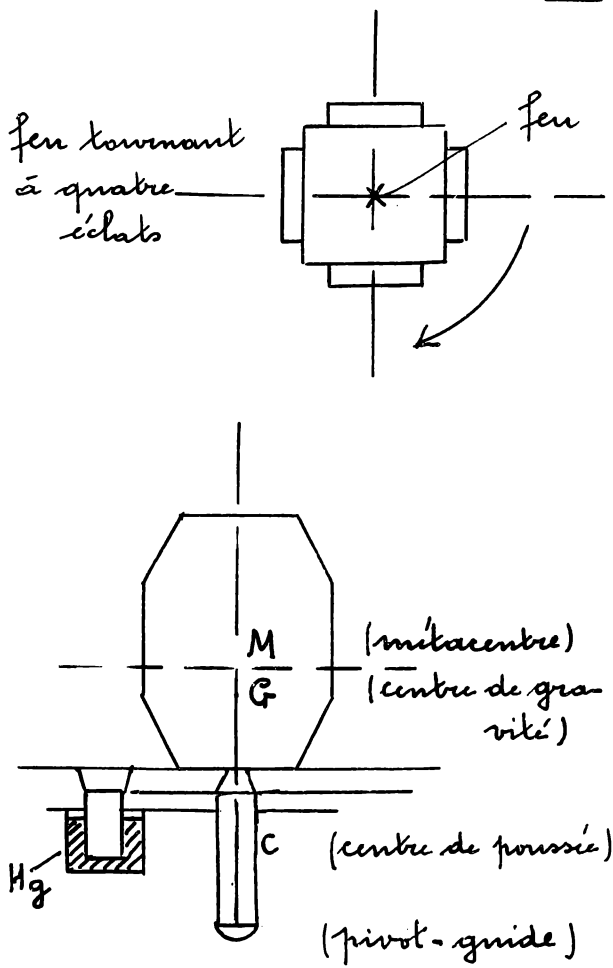
3 Partie optique et lumineuse des phares. Anciennement, la partie optique des phares était constituée par des réflecteurs paraboliques. On les emploie encore pour les projecteurs électriques, principalement sous forme de réflecteurs Mangin, formés d'une lentille divergente concave-convexe, argentée sur la face convexe. La source lumineuse est placée près du foyer, de telle sorte que, après réfraction et réflexion, les

rayons lumineux sortent parallèlement à l'axe de la lentille.



Mais les appareils catoptriques ont cédé le pas aux appareils dioptriques ou à lentilles pour les grands phares. Ils dérivent du principe de la lentille plan-convexe, qui convient pour les petits fanaux. Pour les grandes lentilles, la résistance et le montage exigent une épaisseur minimum aux bords, l'épaisseur sur l'axe optique serait très grande, ce qui augmenterait le poids, le prix et les erreurs de la lentille, ainsi que l'absorption. Pour cette raison, Fresnel a adopté une lentille centrale relativement mince entourée d'anneaux lenticulaires de tracé convenable, séparés par des ressauts orientés suivant les rayons lumi-



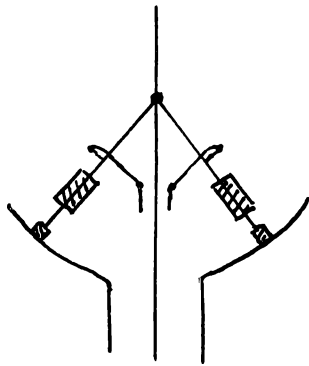


neux. Pour les feux mobiles, on réunit un ensemble de panneaux lenticulaires, résultant de la rotation du profil défini autour de son axe optique. La surface du panneau est augmentée vers les bords par quelques anneaux catoptriques agissant comme prismes à réflexion totale. Les panneaux d'un fanal sont disposés en polygones réguliers (feux à éclats simples), ou en polygones symétriques irréguliers (groupes réguliers d'éclats), ou en polygone ouvert associé avec un réflecteur (un groupe d'éclats et une occultation). Fréquemment on associe deux fanaux sur un même plateau de support. Pour les feux d'horizon, on peut employer une lentille cylindrique, obtenue par rotation du profil défini autour d'un axe perpendiculaire à l'axe optique. Une telle lentille projette une nappe plane lumineuse au lieu d'un faisceau linéaire.

aire ; mais on conçoit que la puissance d'éclaircissement soit beaucoup moindre que celle des panneaux.

On emploie aussi les lentilles sphéro-elliptiques et hyperboliques ; je renvoie pour plus de détails à l'ouvrage de M. Ribière.

Les panneaux assemblés constituent un ensemble entourant le foyer lumineux, reposant sur un support permettant la rotation communiquée par un axe moteur. Anciennement, on employait des roulements à galets ou à billes, mais le poids croissant des appareils augmentait les résistances. Vers la fin du 19^e siècle, M. Baudouin a imaginé de supporter l'optique par un flotteur cylindrique dans une cuve à mercure, ce qui réduit beaucoup les résistances. Dans les derniers types, le flotteur est immédiatement sous le plateau de support du fanal, pour éviter des flexions. Les flotteurs doivent réaliser une stabilité de forme parfaite et l'ensemble fait l'objet d'un équilibrage précis. Un pivot-guide central sert de guide à la rotation, sans réaction horizontale ni verticale. Dans les phares français, la force motrice est produite par la chute lente d'un poids, déterminé en vue d'une vitesse de rotation définie et tout-à-fait uniforme ; le poids est remonté chaque jour (principe des horloges à poids), éventuellement au moyen d'un moteur électrique ou mécanique.



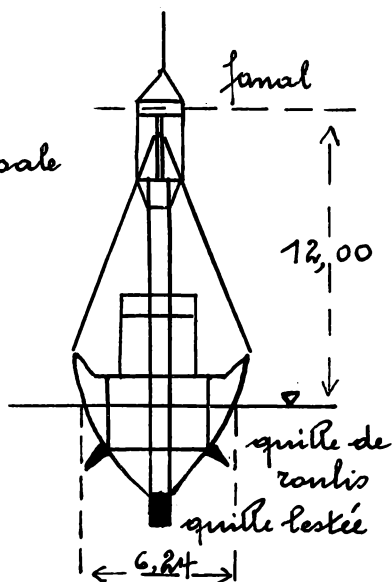
Pour contrôler l'uniformité de la vitesse, on emploie des régulateurs centrifuges dont les boules sont remplacées par des masses appuyées par des ressorts sur une paroi sphérique fixe, dont le centre se trouve légèrement en-dessous de l'articulation des bras du régulateur. Lorsque la vitesse augmente, le frottement résistant augmente aussi, et vice-versa, ce qui assure le réglage.

Comme source lumineuse dans le fanal, on emploie les brûleurs de pétrole, à mèche ou à incandescence, l'incandescence par le gaz ou l'acétylène, l'arc électrique et la lampe électrique à incandescence. Cette dernière tend à supplanter toutes les autres. La source lumineuse doit présenter une intensité maximum dans l'angle utile des panneaux du fanal, dont surtout dans le sens horizontal. Les lampes à incandescence à soufre conviennent bien, ainsi que l'arc électrique alternatif.

Le fanal, ses supports et son mécanisme sont enfermés dans la lanterne vitrée à glaces cylindriques minces, dont les panneaux sont cylindriques pour éviter des réflexions. Malgré cela, des panneaux opaques doivent être disposés dans les angles morts du fanal, pour réduire les émissions de lumière diffuse entre les éclats. La lanterne doit être bien aérée, surtout avec les lampes à combustible liquide ou gazeux.

4 Bateaux - phares. La signalisation maritime des routes importantes près des côtes est complétée par un ensemble de dispositifs de balisage dont les plus importants sont les bateaux - phares gardés, constituant des feux d'avertissement établis en des endroits appropriés, mais où la profondeur et la nature du fond ne permettent pas l'établissement d'une tour. Ils servent surtout à signaler l'entrée des passes de navigation ou les hauts fonds qui les bordent.

coupe transversale
schematique de
bateau - phare
(Sandettié)



Les bateaux doivent présenter une grande stabilité d'oscillation, de manière que le feu éclaire toujours l'horizon et que les conditions de l'équipage, isolé en mer pendant de longues périodes, soient aussi convenables que possible. Les translations horizontales ou plongeantes et le tangage ont peu d'effet; c'est surtout le roulis qu'il importe de réduire. La forme de sous-

marin ne convient pas, par suite des conditions de navigation, d'occupation et d'exploitation. Mais on emploie des coques de forme très spéciale, en demi-fuséau, à grand tirant d'eau, munie d'une quille lestée et de deux quilles de roulis latérales. On a pu ainsi obtenir un feu flottant "Sandettié", : $T = 6$ sec. pour le roulis ; 1,75 sec. pour le tangage. Le navire ayant été incliné de 20° se redresse et s'ovrète en 15 oscillations complètes. Les résultats peuvent être considérés comme satisfaisants. Des palliatifs proposés, basés sur l'effet gyroscopique (turbine à vapeur à axe vertical) placé dans une chambre suspendue à un axe horizontal transversal freiné) ou sur la résistance interne des liquides (test liquide traversant des orifices étroits pour passer d'un compartiment dans un autre) etc, ne se sont pas développés, à cause de la dépense, de la complication d'installation ou même de l'effet dangereux aux grandes oscillations, dans le cas du test liquide.

Il faut que la période propre des oscillations du bateau soit su-

périeure à celle des lames, qui est de $2T = 5$ sec. en moyenne dans la Manche et la Mer du Nord et de 10 sec. environ dans le Golfe de Gascogne

Il faut ensuite que le feu oscille le moins possible ; il est suspendu au pylône du bateau-phare à la cardan. Sa demi-période d'oscillation est

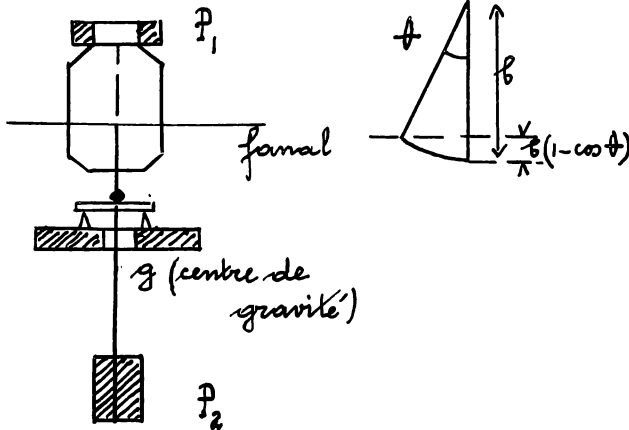
$$T = \pi \sqrt{\frac{I'}{g}}, \quad I' = b + \frac{K^2}{b}$$

b étant le bras de levier du centre de gravité et K le rayon de gyra-

tion central. Pour un travail de choc C , la demi-déviations angulaire est θ telle que

$$C = P b (1 - \cos \theta)$$

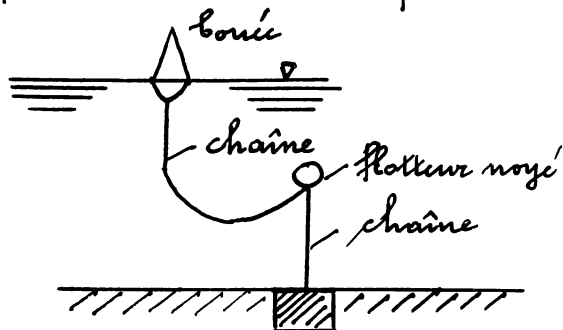
Pratiquement, le fomal porte une tige axiale lestée d'un poids important P_2 sous le cardan. Le fomal porte à la partie supérieure une couronne en fonte P_1 servant aussi de lest. Le centre de gravité de l'ensemble se trouve légèrement sous le plateau du cardan. b est donc petit, mais comme P est très grand, θ reste petit. Mais l'est grand parce que b est petit et que K est très grand. Donc la période est longue et atteint $T = 7$ sec. Le mouvement doit être amorti et le pendule bien libre sur son support. Pour cela, on constitue le cardan par des supports à contact en acier dur. Le plateau mobile du cardan repose par une double rangée de billes sur le plateau fixe, de manière à transmettre les réactions verticales et horizontales ; il est muni d'une couronne dentée attachée par un pignon. Pour les détails de ces roulements, voir l'ouvrage de M^r Ribière.



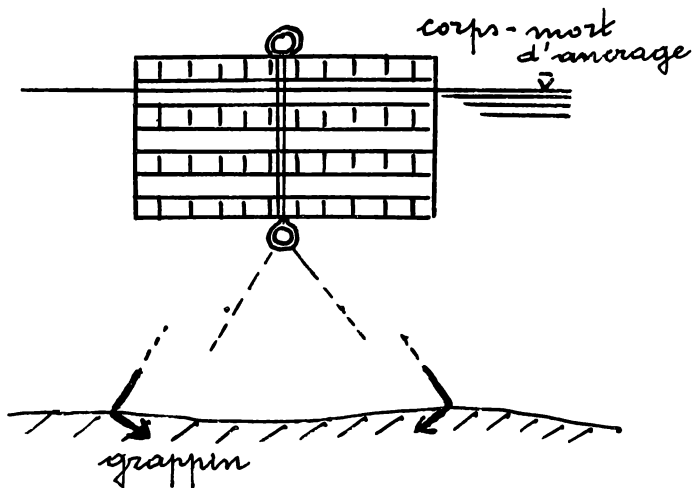
Par ces dispositions, on a constaté sur le "Sandettier", que malgré une amplitude totale de roulis de 32°, l'amplitude totale d'oscillation du fanal ne dépassait pas 10 à 12°.

On construit aussi des feux flottants non gardés, à service automatique. Ils sont visités régulièrement, pour renouveler les provisions de combustible pour l'éclairage, d'air comprimé pour les sirènes et la force motrice, remonter les mécanismes, etc. Leurs dispositions sont analogues à celles des bateaux-phares.

5 Bouées et balises - La signalisation secondaire et rapprochée des passes, hauts fonds, écueils, musoirs, etc. se fait au moyen de bouées flottantes et de balises fixes.



Les bouées sont des flotteurs lestés, à faible surface de flottaison, munis aux endroits convenables et attachés par une chaîne à un corps mort : masse pesante, ancre, pieu à vis, etc. La chaîne a le mou strictement nécessaire pour le marnage de marée. Pour éviter le frottement de la chaîne sur le fond, qui l'use, on tient la partie inférieure toujours tendue par un flotteur noyé.



Les flotteurs en pièces de bois superposés et assemblés ne conviennent guère; ils sont peu visibles et peu stables. On ne les emploie que pour l'amarrage des navires. On se sert surtout de flotteurs vœux en tôles rivées ou soudées, lestées inférieurement et visibles pour elles-mêmes ou portant un signal (fanneau), ou fanal allumé la nuit, ou un signal sonore animé par les lames (cloche, trompe à anche ou commandé (sirène).



Comme forme, on emploie le cylindre surmonté d'un mât en treillis, ou la bouée sphéro-conique ou la bouée à fuseau (à queue effilée et lestée), parfois une forme de coque de navire.

Lorsque les bouées portent un fanal, elles possèdent un réservoir de pétrole ou de gaz éclairant.

Pour les fonds peu profonds, on établit des balises, signaux portés par des perches ou poteaux en béton armé ou en acier chromé, scellés dans le fond

— Fin. —