

**Société Coopérative de
l'Association des Elèves des Ecoles Spéciales
de l'Université de Liège.**

**COURS
DU GÉNIE CIVIL**

VOIES NAVIGABLES

Notes publiées avec l'autorisation de Monsieur le Professeur **CAMPUS**

IMPRIMERIE LITHOGRAPHIE

AUG. PHOLIEN

57, RUE SUR LA FONTAINE, 57

LIÈGE

Première section: Canaux de navigation.

Chapitre I. - Considérations sommaires sur la navigation.

§ I. Généralités. Dans la partie du cours relative aux voies navigables, nous étudierons les voies de navigation intérieure, c'est à dire celles qui sont accessibles en principe seulement aux bateaux d'intérieur à faible tonnage et faible tirant d'eau, par différence avec les voies de navigation dites maritimes, qui prolongent dans l'intérieur des terres les accès des bateaux de mer et dont les caractéristiques sont conditionnées par les dimensions de ces navires.

L'étude de ces dernières est rattachée aux travaux maritimes, en ce qui concerne les dispositions essentielles. Toutefois, certaines particularités connexes seront examinées dans la présente partie du cours.

Les voies navigables doivent satisfaire aux nécessités de la navigation; leur étude doit donc être basée sur la connaissance du matériel, des méthodes et des caractères économiques de la navigation d'intérieur.

La navigation intérieure de quelque importance se fait au moyen de bateaux dont le tonnage varie d'une centaine à peu de milliers de tonnes, qui répondent aux noms généraux de péniches ou chalands. La navigation est ancienne sur les cours d'eau naturels et un matériel de grande capacité a pu être employé d'ancienne date sur des cours d'eau très importants comme le Rhône, le Rhin, l'Elbe, le Danube, le groupe Escaut - Meuse, etc.

Mais ces voies d'eau étant sans communication entre elles ou réunies en petits groupes isolés, les engins de navigation adaptés aux circonstances de chaque bassin et aux habitudes régionales diffèrent d'un réseau à l'autre comme dimensions, tonnage, forme, mode de construction, etc, et portent souvent des noms particuliers.

Au cours de ces dernières années, une tendance à la jonction des grandes voies de navigation s'est manifestée. D'abord nationale (jonction des voies

françaises, allemandes, etc) elle est devenue internationale. Des liaisons Rhin - Danube, Rhin - Rhône, etc, à grand gabarit, sont en voie de réalisation ou en projet. Cette tendance est favorisée par l'activité diplomatique qui a produit l'internationalisation des grands fleuves tels que le Rhin, le Danube et l'action des commissions internationales qui sont chargées de l'application des conventions d'internationalisation. Ses conventions plus récentes établies sous les auspices de la section du Transit et des Communications de la Société des Nations, notamment celle de 1925 sur l'unification des méthodes et certificats de jaugeage, constituent à la fois une conséquence pratique des liaisons déjà réalisées en même temps et surtout une préparation et une amorce à la généralisation de la navigation trans-européenne.

Il doit en résulter une tendance à l'unification raisonnable du matériel de navigation. Sans être aussi nécessaire ni aussi parfaite que dans le matériel de chemin de fer, elle est cependant très désirable. Dans la situation actuelle, les ingénieurs peuvent être placés devant le dilemme de devoir donner aux ouvrages des dimensions exceptionnelles pour permettre la navigation d'un petit nombre de bateaux d'un format exceptionnel ou bien d'empêcher leur accès en construisant les ouvrages d'après les dimensions traditionnelles. Cette dernière méthode, qui paraît la plus raisonnable, peut être cependant fâcheuse si les bateaux considérés sont d'un type très local, d'un tonnage très modéré et si la voie d'eau est susceptible d'un grand développement et notamment d'un trafic intense ou d'une liaison ultérieure avec une autre voie importante. Par exemple, le gabarit des canaux français correspond à la péniche de 300T, c'est en somme le gabarit des voies belges actuelles et on peut le considérer comme marquant à l'époque où il fut conçu et comme satisfaisant encore pour des voies d'utilité purement régionale. Mais pour des voies qui, comme le canal de la Meuse au Rhin et ses embranchements, devraient être des tronçons d'une grande voie internationale, il est nettement insuffisant. Même dans l'intérieur du pays, il ne permet pas l'accès des bateaux de Seine, par exemple.

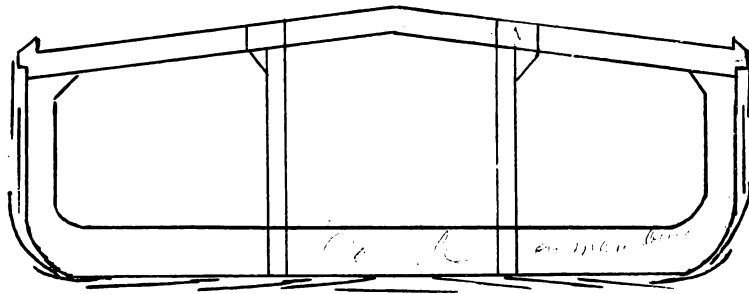
Quoiqu'il en soit, la question ne peut plus être négligée et l'étude des

dimensions d'une nouvelle voie de navigation, surtout d'un canal, doit envisager, dans la plus grande mesure possible, les probabilités de développement et le gabarit des voies existantes ou projetées susceptibles d'être en liaison avec la voie étudiée.

§2. - Matériel de navigation. -

Les bateaux d'intérieur se construisent en bois (système ancien, ne s'emploie plus qu'une fois pour les petites dimensions. - 300 T. par ex.), en fer (méthode moderne et qui tend à se généraliser) et en béton (peu développé et peu susceptible de développement).

Les éléments essentiels de résistance et de forme sont les membrures ou couples, éléments transversaux de l'ossature, en forme d'auges. Ils sont consolidés par des traverses supérieures qui supportent le pont et qui, dans les grands bateaux, sont parfois soutenues par des montants. Il n'y a pas de



quille. Les couples sont réunis par les parois de bordage, renforcées éventuellement par des longrines, et par le plancher du pont. Aux extrémités du bateau se trouvent généralement des cabines pour le logement des marins; les bateaux français ont souvent une écurie au centre pour les chevaux de halage. Si le bateau est automoteur, la machine est généralement à l'arrière. Les bateaux sont munis de pompes, le plus souvent à main, pour épuiser les eaux, réunies en un point bas (puisard).

Les bateaux d'intérieur ont un certain appareillage ou ornement: un mât mobile pouvant être rabattu pour le passage sous les ponts; les mâts de canal dont nous verrons plus loin l'utilité; des crochets et balards d'amarrage; des treuils; une petite grue de manœuvre de la passerelle d'accostage; parfois des mâts avec biquets à mouffes pour le déchargement (grands bateaux, etc.)

La sorte de chargements est généralement centrale et ouverte par de vastes écoutilles que l'on peut obtenir par des panneaux amovibles ou des prélaris imperméables.

Les dimensions caractéristiques d'un bateau sont: la longueur maximum L dans le plan de symétrie (gouvernail non compris pour le déplacement, gouvernail compris ou rabattu pour le gabarit des ouvrages de navigation); la largeur maximum l au maître couple (ou plus grande section transversale.); l'enfoncement maximum t depuis le plan d'eau à la partie inférieure du bateau.

La partie immergée du bateau est donc tout entière comprise dans une capacité parallélépipédique $L l t$.

Le déplacement est le volume d'eau V , limité au plan de flottaison, déplacé par la partie immergée du navire. Son poids est égal au poids total du bateau. Le rapport du déplacement à $L l t$ est le coefficient de déplacement Q

Le coefficient de déplacement varie en sens inverse de la finesse des formes. Il est toujours inférieur à 1 et d'autant plus que les formes sont plus fines. La finesse des formes diminue la résistance à l'avancement. Donc, en vue de faciliter la navigation et la vitesse, il faut réduire le coefficient de déplacement (0,60 à 0,70 pour les bateaux à vapeur rapides pour voyageurs). Pour les grandes péniches de canal, naviguant en eau calme, à faible vitesse, on cherche au contraire à rendre ce coefficient maximum, on atteint jusqu'à 0,95 et davantage. Les bateaux mixtes ou devant naviguer dans des fleuves à courants, doivent avoir plus de finesse; le coefficient varie de 0,87 (b. du Rhin) à 0,80 pour les fleuves; 0,90 en moyenne pour la navigation mixte.

En moyenne, 20% du déplacement maximum correspondent au poids mort ou à vide et 80% à la charge maximum.

Si on connaît

$$t : l : L = 1 : m : n$$

et

$$Q = \frac{V}{L l t}$$

on peut en déduire les dimensions du bateau pour porter une charge.

$$Q = 0,8 V$$

En moyenne, $t : l : L$ varie de 1 : 3 : 2 à 1 : 4,5 : 36 pour les bateaux de canal

Tableau des dimensions de quelques types de bateaux

	L (m)	l (m)	h (m)	t		f (m)	V		P	
				max. (m)	min. (m)		à vide (t)	enf. max. (t)	à vide	enf. max.
Bateau du Rhin I	78,3	10,49	2,38	0,49	2,38	0,00	305	1584	0,86	0,87
" " " II	82,7	10,09	2,63	0,49	2,53	0,10	323	1777	0,85	0,87
" " " III	87	10,07	2,73	0,47	2,60	0,13	357	2112	0,85	0,87
" " Danube	63	8,20	2,40	0,34	1,90	0,50	135	810	0,79	0,825
" " de l'Oder	55	8,00	2,22	0,40	1,97	0,25	148	753	0,91	0,89
Canal Dortmund-Ems	67	8,20	2,50	0,45	2,42	0,08	180	1122	0,81	0,88
Bot. du Canal de Strasbourg.	38,5	5	2,34	0,30	2,24	0,10	53	413	0,99	0,95
Léniche en bois (flamande)	38,5	5	2,38	0,26	2,24	0,14	49	423	0,99	0,99
Bateau normal du gabarit français de 1874	38,5	5		$\underbrace{\quad\quad\quad}_{1,80}$ (enfouissement max. autorisé)			V utile = 285T			0,97
Chalands du Rhône :										
forme cuillérée	57,30	7,58	2,54	0,30	1,40		V utile { 400T 388T			env. 0,81
forme à étrave.	57,86	8,08	2,54	0,30	1,40					env. 0,74
Kast campinois	50,00	6,60		2,24				550 ^x		0,95
Barques du Rhône (nouveau matériel en fer)	65,00	7,90	2,50	1,80 ⁺			140	765 ⁺		0,83

x pour t = 1,90 V = 450T

+ t max. et V max. autorisés.

situées aux quarts extrêmes du bateau et au milieu s'il y en a 3. Des plaques de jaugeage, placées aux extrémités supérieures des échelles, indiquent l'enfoncement maximum. On détermine les déplacements partiels, de décimètre en décimètre d'enfoncement, par la formule de la moyenne des aires. Les aires sont déterminées par la formule de Simpson. On admet que, dans chaque intervalle d'un décimètre, le déplacement correspondant à un centimètre soit constant. L'origine des échelles est au point le plus bas du bateau ou bien au plan de flottaison à vide, le bateau portant ses agrès normaux et une quantité normale définie d'eau. Le chargement se mesure par différence des moyennes des lectures de toutes les échelles après et avant chargement; on multiplie cette différence par le poids spécifique de l'eau.

Les opérations de jaugeage sont effectuées par des Administrations publiques (Ponts et Chaussées en Belgique et en France) et officiellement enregistrées. Dorénavant, elles se font dans les principaux pays d'Europe d'après des règles uniques fixées par la Convention internationale de Paris de novembre 1925. Les bateaux peuvent ainsi passer d'un pays à l'autre sans rejaugage.

§ 3. Résistance à l'avancement des bateaux.

La résistance R à l'avancement d'un navire comporte 2 termes, la résistance de frottement R_f et la résistance de rencontre ou résiduelle R_r . On néglige la résistance de l'air, généralement très faible, même aux grandes vitesses. En eau très large et très profonde, la loi de la résistance de frottement, d'après Froude, est $R_f = \varphi S v^2$ pour l'eau à la température moyenne. S est la surface mouillée du navire, mesurée en multipliant le développement des couples par l'entredistance. v est la vitesse relative du navire et de l'eau. φ est un coefficient égal à $0,1392 + \frac{0,258}{2,68 + L}$.

La résistance de rencontre provient du choc de l'eau sur le navire, qui provoque une élévation de l'eau en avant et la formation de vagues. Il se forme de petites vagues divergentes, partant de l'étrave et de l'arrière, qui se produisent même aux faibles vitesses et s'affaiblissent rapidement. Aux grandes vitesses relatives, il se forme de grandes vagues transversales, par choc à l'avant et par dépression à l'arrière. Ces deux causes se superposent à l'arrière du navire pour former un remous important, dont l'énergie corres-

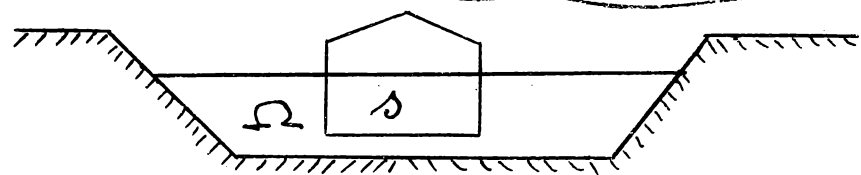
pond à un travail produit pour l'avancement du navire. La résistance de choc, dite directe, peut s'exprimer sensiblement par la formule $k s v_r^2$, s étant la section du maître-couple immergé. La résistance due aux vagues et remous s'y ajoute et ne devient importante qu'aux grandes vitesses relatives. Mais dans un canal, de largeur et de profondeur faibles, les circonstances se modifient très sensiblement. (1)

Considérons un bateau de section immergée s se déplaçant dans un canal de section mouillée Ω . Désignons par n le rapport $\frac{\Omega}{s}$. Dans la section où passe le bateau, la section d'écoulement est réduite au repos à $\Omega - s = \Omega \frac{(n-1)}{n}$.

Il en résulte que si le canal écoule un débit $Q = \Omega u$, la vitesse moyenne de long du bateau devient $u_z = u \frac{n}{n-1}$.

Mais si le bateau avance, une autre augmentation de vitesse relative, indépendante de la vitesse et du sens du courant, provient du refoulement de l'eau déplacée par le bateau entre celui-ci et les parois du canal, en sens inverse de la marche. (1/11) $v' = \frac{v \cdot \Omega}{\Omega - s} = \frac{v}{n-1}$

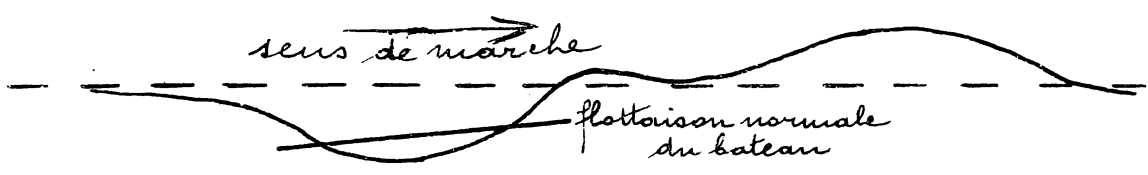
Si l'on suppose que dans ce phénomène le plan d'eau reste invariable, la vitesse propre de refoulement de l'eau est v' telle que $v'(\Omega - s) = v s$, d'où $v' = \frac{v}{n-1}$, v étant la vitesse absolue du bateau.



La vitesse relative du bateau par rapport à l'eau est donc $v_z = v + v' = v \frac{n}{n-1}$.

Si il y a en plus un courant de vitesse $\pm u$, $v_z = v + v' \pm u = (v \pm u) \frac{n}{n-1}$.

En réalité, le phénomène est encore plus complexe. Car, par suite du choc et pour produire la charge nécessaire à l'écoulement de l'eau entre le bateau et le fond, le plan d'eau s'élève à l'avant et s'abaisse le long du bateau. Une inclinaison du bateau vers l'arrière accompagne cette déformation du



(Abaissement d'un bateau se mouvant dans un canal, d'après les expériences sur modèles de H. Engels).

plan d'eau. Le phénomène est très accentué aux grandes vitesses, qui ne peuvent d'ailleurs être réalisées dans la navigation réelle. Mais on constate dans les essais sur modèles que, en eau peu profonde, les bateaux peuvent toucher le fond aux très grandes vitesses.

Donc, la section mouillée est réduite sur la plus grande partie de la longueur du bateau c'est à dire que n diminue en mouvement, d'autant plus que la vitesse est grande et que n est plus petit initialement.

Dans les canaux d'intérieur, l'abaissement du plan d'eau ne dépasse généralement pas 0,10 cm. Par suite des faibles vitesses de marche et des valeurs usuelles assez grandes de n , on néglige généralement cette variation. D'après Hb. Sonne, on peut en tenir compte comme suit: la réduction de section d'écoulement est $w = ys$, avec $y = \alpha_t (v - \beta)^2$.

α_t est un coefficient dépendant de l'enfoncement t pour un même bateau β un facteur dépendant de la forme du bateau (vitesse minimum d'abaissement)

Donc, $v'(\Omega - s - w) = v(s + w)$

$$v_2 = v + v' = v \left(1 + \frac{s+w}{\Omega - s - w} \right) = v \frac{n}{n - (1+y)}$$

La formule précédente de y est complexe, mais, d'après les résultats de divers essais réels, on peut admettre avec assez d'exactitude pour les calculs d'application $y = 0,20 \beta^3 v^2$ pour $\beta < 0,95$

Donc
$$v_2 = v \frac{n}{n - (1 + 0,20 \beta^3 v^2)}$$

Pour $\beta > 0,95$, il semble que y est sensiblement constant, ou même décroissant, d'après certaines observations de Hb. de Hbas.

Si l'on néglige les frottements et pertes de charge, on peut aussi déterminer l'abaissement du plan d'eau par le th. de Bernoulli:

$$\Delta h = \frac{(v+v')^2 - v^2}{2g} = \frac{v^2}{2g} \left[\left(1 + \frac{s+w}{\Omega - s - w} \right)^2 - 1 \right]$$

On obtient une équation du 2^e degré en y :

$$\frac{v^2}{2g} (1+y)(2n-1-y) = y(n-1-y)^2 \frac{s}{\lambda - l}$$

λ est la largeur du canal au plan d'eau.

D'après les expériences sur bateaux réels de Hb. de Hbas et les expériences sur modèles de Hb. Gebers (Vienne) et d'autres expérimentateurs, la résistance au mouvement des bateaux dans les canaux est proportionnelle à la puissance 2,25 de la vitesse relative. On peut considérer qu'elle se compose

des deux termes déjà définis. La résistance de rencontre, qui correspond au choc des filets liquides sur l'avant du bateau dépend de sa forme. Elle peut s'écrire

$$R_2 = k s v_z^{2,25}$$

D'après Hb. H. Engels, $k = 1,7$ pour des bateaux fins ou des péniches vides,
 $k = 3,5$ pour des péniches chargées.

La résistance R_f provient du frottement de l'eau sur les parois latérales et le fond du bateau. Son expression est plus complexe et dépend notamment de la distance du fond du bateau au plafond du canal. Eoulor (E. V. A.) en a déterminé une valeur critique $t_c = \frac{H \sqrt{L}}{2,98(3,6 v)}$, H étant la profondeur du canal et l'eau étant tranquille.

Si l'enfoncement est inférieur à la valeur critique, $R_f = f S v_z^{2,25}$, S étant la surface mouillée totale. D'après H. Engels, $f = 0,14$ pour un bateau en métal à surface lisse. Pour un bardage rugueux en bois, la valeur peut être doublée. Si l'épaisseur d'eau sous le bateau est inférieure à $(H - t_c)$, la formule la plus générale de Gebers est $R_f = (f S_e + f' S_f) v_z^{2,25}$

S_e étant la surface latérale mouillée, S_f la surface du fond ($S_e + S_f = S$).

D'après H. Engels si $H - t = 0,25$	$f' = 0,350$	} pour un bateau en métal comme ci-dessus.
0,50	= 0,258	
0,75	= 0,185	
1,00	= 0,140 = f	

La résistance totale est $R = R_z + R_f = K(\sigma, t) v_z^{2,25}$

Hb. de Meas, d'après des expériences sur bateaux réels préconise la formule suivante en eau libre $R = (A + B t) v_z^{2,25}$

t étant l'enfoncement. Il a trouvé pour les coefficients A et B les valeurs suivantes:

Péniche flamande	$A = 21,3$	$B = 123,6$	$\delta = 0,99$
flûte	$A = 21,5$	$B = 78,1$	$\delta = 0,95$
toue	$A = 14,2$	$B = 52,4$	$\delta = 0,97$

D'après cela, la résistance de la toue serait sensiblement moindre, ce qui n'est vrai qu'aux vitesses sensiblement inférieures à 1 m/". Pour les vitesses supérieures, il y a intérêt à affiner l'avant transversalement (étrave) et l'arrière en hauteur (poupe), on obtient ainsi la forme des chalands proprement dits.

D'après H.C. de Cas, en canal $R_c = R \times C$, C étant un coefficient de majoration dépendant de n et qui pourrait donc être $C = \left[\frac{n}{n - (1 + 0,2 \delta^3 v^2)} \right]^{2,25}$

Ces formules déduites d'expériences ont l'inconvénient de n'être valables que dans les conditions de ces expériences. Pour d'autres formes de bateaux, il faut déterminer les coefficients par de nouvelles expériences. La résistance de frottement peut se déduire assez exactement des formules. La résistance de rencontre satisfait à la loi de similitude et peut se déduire d'essais sur modèles, qui sont aussi utiles pour comparer des formes de bateaux. Aux faibles vitesses, la résistance de rencontre est faible si les formes sont quelque peu affiniées.

Les considérations précédentes s'appliquent aux vitesses de marche ordinaires des bateaux d'intérieur, $< 3 \text{ m/s}$ en général. Mais la propagation des vagues est influencée, comme on sait, par la profondeur du canal. Lorsque la vitesse du bateau atteint la vitesse \sqrt{gH} de la propagation de l'onde solitaire, la vague reste fixe par rapport au bateau, c'est à dire qu'elle disparaît. Le bateau est emporté sur l'onde et la résistance en est fortement réduite. Si la vitesse dépasse celle de l'onde, la résistance augmente de nouveau très rapidement. Mais la vitesse critique ne peut pratiquement guère être atteinte dans les canaux de profondeur normale ($H = 2,5 \text{ à } 3,00 \text{ m}$, $\sqrt{gH} = 5 \text{ à } 6 \text{ m/s}$).

Pour un train de bateaux, la résistance totale est égale à la somme des résistances individuelles, en règle générale. Si la traction s'effectue par un remorqueur, la résistance du premier bateau augmente de 10 à 20% s'il se trouve à 50 m. environ du remorqueur et d'une proportion plus grande si la distance est moindre. L'accroissement peut être négligé si la distance atteint 100 m. Il y a intérêt à affiner par une étrave, l'avant des bateaux remorqués.

On peut donc considérer approximativement que, pour des valeurs assez élevées de n (> 5 , par ex.) et une profondeur d'eau constante, la résistance à la traction d'un même bateau croît suivant la puissance 2,25 en rapport $\frac{n}{n-1}$.

Ce dernier facteur est voisin de l'unité si n est grand (> 10), il est égal à 4,557 si $n = 2$ et tend vers l'infini lorsque $n \rightarrow 1$. Mais pour les petites valeurs de n , il faut envisager le facteur $\left[\frac{n}{n - (1 - \gamma)} \right]^{2,25}$, variable avec la vitesse. Le problème est donc très complexe. Les essais n'ont pas permis d'établir une expression simple en fonction de n ($n = \frac{v}{\sqrt{gH}}$, l'état de n pos).

Si le canal débite, la vitesse moyenne n du courant varie en sens inverse de n et la résistance croît très rapidement. Dans une section rétrécie, la résistance à l'avancement d'un bateau peut devenir un multiple élevé de la résistance normale, supérieur au rapport des valeurs de $\frac{1}{n^2}$. D'après les formules de Gebers, l'augmentation est encore plus grande si la réduction de section porte sur la profondeur que si elle se rapporte à la largeur.

En conclusion, s'il n'existe pas, dans l'état actuel de la question, de formules permettant de prédéterminer avec certitude l'effort de traction d'un bateau dans un canal, elles font connaître néanmoins l'ordre de grandeur.

Pour avoir des valeurs réelles, il faut procéder à des essais dynamométriques ou se référer à des essais effectués dans des conditions identiques.

Mais l'étude précédente a surtout l'avantage de justifier les règles essentielles ci-après :

I.) Afin de ne pas exiger des efforts de traction trop élevés, il ne faut pas descendre en dessous d'une valeur de n voisine de 5 et considérer 3 comme un minimum absolu.

II.) Il faut éviter, dans une voie navigable, des passages rétrécis produisant une grande réduction de n , même sur une petite longueur. Car ce passage exige des moyens de traction exceptionnels et de grandes pertes de temps, il allonge beaucoup le parcours virtuel.

III.) Il est rationnel, en vue de l'économie de traction, d'augmenter la valeur de n d'après les vitesses de marche maxima prévues. H. Engels propose :

$$n = 5 \text{ à } 6 \quad \text{pour } v < 1,50 \text{ m}'' \quad (5,4 \text{ km/h}).$$

$$7 \quad v = 1,5 \text{ à } 1,75 \text{ m}''$$

$$10 \quad v = 1,75 \text{ à } 2,00 \text{ m}''$$

IV.) A section égale, la plus profonde est plus avantageuse que la plus large.

La résistance à la traction du bateau normal français, à 1,80 m. d'enfoncement et à la vitesse de 3 km/h., a été trouvée égale à 300 kg. environ en canal, pour $\Omega = 34 \text{ m}^2$, $\sigma = 9 \text{ m}^2$, $n = 3,8$ et une profondeur d'eau de 2,12 m.

Cette valeur est un maximum qu'il faut éviter de dépasser pour un bateau de 300 tonnes.

A la résistance de l'eau s'ajoute, à la remonte d'une voie navigable à

courant, la résistance due à la pente superficielle i qui est $\bar{\omega} i V$, $\bar{\omega}$ étant le poids spécifique de l'eau et V le déplacement. Cette résistance n'est pas négligeable, malgré que la pente soit généralement inférieure à 0,0005. Ainsi, pour un bateau déplaçant en tout 350 t., une pente de 0,0004 donne une résistance de 140 kg. pour une charge utile de 285 t. environ. Si l'on tient compte qu'en outre la vitesse relative est accrue, on voit que la navigation en remonte est beaucoup plus défavorable qu'en eau tranquille. Le gain à la descente ne compense pas le supplément de travail en remonte.

§4.) Méthodes de navigation. (Voir: Étude économique, technique et réglementaire de l'exploitation et de la traction mécanique des bateaux sur les fleuves et canaux, par C. Savand.)

Les méthodes rudimentaires du flottage ne s'appliquent qu'au transport des bois et ne nous intéressent que pour mémoire.

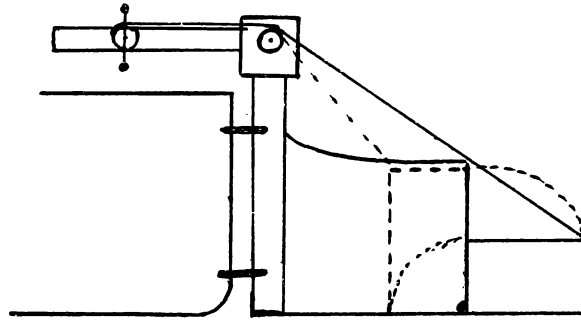
On peut laisser flotter les pièces isolées au fil de l'eau ou, ce qui est préférable pour éviter les dégradations, assemblées en radeaux qui sont eux-mêmes fréquemment réunis en trains. La direction des trains se fait, au moyen de perches, de gouvernails latéraux et d'ancres traînantes. La navigation ne se fait qu'en descente et exige 0,30 à 0,50 m. de profondeur d'eau.

La navigation par bateaux permet le transport de toutes marchandises surtout pondéreuses et en vrac. Cependant, des bateaux rapides font aussi le service de messageries et de voyageurs.

À la descente, la navigation peut se faire sans force motrice, le bateau descendant au fil de l'eau à la vitesse du courant. Mais cette navigation est dangereuse, en ce sens que, n'ayant aucune vitesse relative par rapport à l'eau, le bateau se trouve dans l'impossibilité de manœuvrer par un gouvernail. Il faut ralentir la marche du bateau par des ancres traînantes ou des gaffes appuyées sur le fond, ou bien lui donner une vitesse positive par rapport au courant, par une action motrice dans le sens de la marche, tout comme à la navigation en remonte.

Un point essentiel dans la navigation des bateaux est la faculté de manœuvre. L'organe de manœuvre est le gouvernail, généralement placé à l'avrière. On emploie parfois aussi des gouvernails latéraux (dérives) en cas

de navigation à la voile (Hollande). Les actions directrices sont proportionnelles au carré de la vitesse relative du bateau par rapport à l'eau et à la grandeur des surfaces. Donc le gouvernail doit être d'autant plus grand que la vitesse relative est plus faible. Celui des péniches est plus grand que celui des bateaux à moteurs, certains en ont deux. Sa longueur varie de 0,04 à 0,08 L et ne doit pas dépasser 0,5 l. Les bateaux de canal ont souvent, pour cette raison,



un gouvernail en 2 pièces, dont l'une peut se relever et s'effacer derrière la partie fixe, par exemple, à la traversée des écluses.

À la remonte, la navigation exige un moyen de traction ou de propulsion. Sur les voies navigables assez larges, la navigation à la voile se pratique quelquefois. Pour les bateaux moyens, le halage est la méthode de traction la plus répandue. Enfin, le remorquage et l'auto-propulsion sont aussi très employés.

§ 5.) Halage animé et mécanique.

Le halage par hommes est devenu peu fréquent dans les pays industriels. L'effort individuel moyen maximum de 25 kg. permet une vitesse de 0,4 m/" en moyenne, soit 1,5 km/h. environ.

Le halage par chevaux est le plus répandu. L'effort moyen est de 70 kg. environ par cheval, à la vitesse de 1,10 m/" ou 4 km/h. et pour un travail de 8 h. À ce régime, il faudrait donc 6 chevaux environ pour un bateau de 300 k. du type français, en canal. Or, le halage se fait généralement dans ces conditions par 2 chevaux, marchant à une vitesse moindre, mais développant un effort supérieur à l'effort normal moyen. D'après les chiffres précités, pour une vitesse de 2,5 km/h., la résistance à l'avancement du bateau est d'environ 200 kgs, soit 100 kgs. par cheval. Un cheval peut développer cet effort à cette vitesse pendant la durée normale du travail (d'après les

formule de H. Cascheck, donnée dans le cours de routes auquel je renvoie pour plus de détails au sujet du travail de traction des moteurs animés).

Le parcours journalier moyen est d'environ 15 à 20 km. Le halage se fait par les chevaux du bord ou les chevaux de lanage.

Le halage mécanique a fait l'objet de nombreux essais mais n'a reçu, en somme, que des applications isolées. Cela résulte moins de difficultés d'ordre technique que de nature professionnelle et économique. Le prix d'installation kilométrique est élevé, les frais d'exploitation sont relativement grands et le trafic de navigation n'est, en général, pas assez régulier ni réglé pour assurer un rendement financier. Les conditions du succès sont donc, en tous cas, un trafic suffisant, homogène et peu variable. Un monopole de traction favorise le rendement de l'installation si le trafic n'est pas d'une intensité particulière et si les conditions de transport restent compatibles avec les conditions économiques.

Il existe en France et en Allemagne des canaux où la traction se fait au moyen de locomotives électriques à adhérence par le poids. Les locomotives circulent sur rails en voie ordinaire. Le procédé d'exploitation le plus simple est celui de la navette par sections de longueur proportionnée au trafic. On évite ainsi les croisements toujours difficiles. La vitesse de traction est généralement un peu plus que celle du halage par chevaux (3 km/h). L'effort de traction moyen s'élève à 1000 ou 1200 kgs. et peut atteindre exceptionnellement 2000 kg. au démarrage. Ces engins peuvent traîner un train de 2 à 3 bateaux de 300 t. ou un bateau de 600 à 800 t. Les locomotives des canaux du Nord français pèsent environ 10.000 kgs.

On a fait, en Amérique, des applications isolées des systèmes Wood et Gérard⁽¹⁾, Clarke-Blackwell, à adhérence proportionnelle à l'effort de traction. La locomotive roule au moyen de deux roues sur un monorail en I, soutenu par des potelets et consoles. A l'opposé des roues, deux galets sont pressés sur la face inférieure du rail par des leviers en relation avec le crachet d'attache du câble de halage. La pression de ces galets est ainsi rendue proportionnelle à l'effort de traction. Un moteur électrique unique commande

(1) M. S. Gérard était un ingénieur belge qui s'est beaucoup occupé de traction électrique des bateaux.

les 2 roues. La locomotive est très légère (3 tonnes dans le système Gérard-Cl.-Bl.) Elle exerce un effort de traction de 1000 kg à 7,2 km/h (puissance 45-55 C.V.) et peut atteindre 3000 kgs aux vitesses inférieures. Le retour à vide se fait à grande vitesse. Le rendement est presque constant et très élevé (72,5% - Voir: Der Wasserbau, par H. Engels, tome II). L'inconvénient par rapport au binail ordinaire est l'encrentrement du monorail au dessus du chemin de halage. Le système ne s'est pas répandu en Europe pour cette raison, mais il y a donné naissance au système Chesneau, dans lequel le monorail est remplacé par un câble porteur supporté par des poteaux assez élevés, de sorte que le halage par chevaux n'est plus entravé.

Les locomotives à vapeur et à essence ne semblent pas avoir fait l'objet d'applications durables. D'une manière générale, la pose d'une voie assez solide pour supporter un poids adhérent assez élevé et les efforts latéraux de traction constitue une grande sujétion, d'autant plus que les chemins de halage sont généralement étroits et rudimentaires.

Le progrès des petits tracteurs à essence, très robustes, souples et indépendants, semble les rendre susceptibles d'applications intéressantes pour le halage. C'est un vrai cheval mécanique. Il a l'avantage de n'exiger aucune installation fixe coûteuse d'établissement et d'entretien. S'il ne s'est pas encore répandu, la cause en réside aussi surtout dans l'insécurité d'exploitation (rendement non assuré). Il y a aussi un écueil technique: le défaut d'appropriation des chemins de halage, qui sont promptement dégradés, - produit l'usure rapide des jointes. En fait, il faudrait des chemins de halage aménagés comme des routes propres à la circulation automobile. Mais dès lors, l'économie d'établissement et d'entretien du système, est problématique.

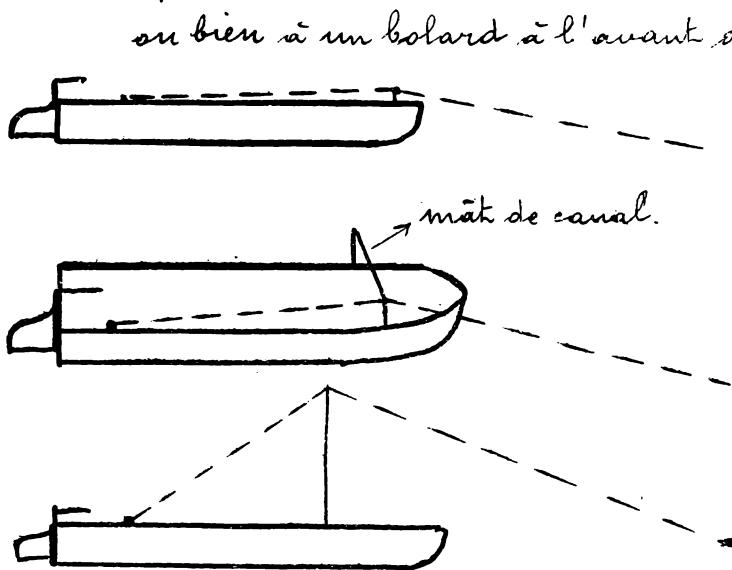
(Voir rapports: de M. E. Gérard, Congrès International de Navigation de Dusseldorf, 1902;

H. Byls, " " " " du
Caire, 1926).

On a essayé anciennement et on emploie encore en France le tracteur électrique sans rails, souvent à trois roues, appelé tricycle ou cheval électrique.

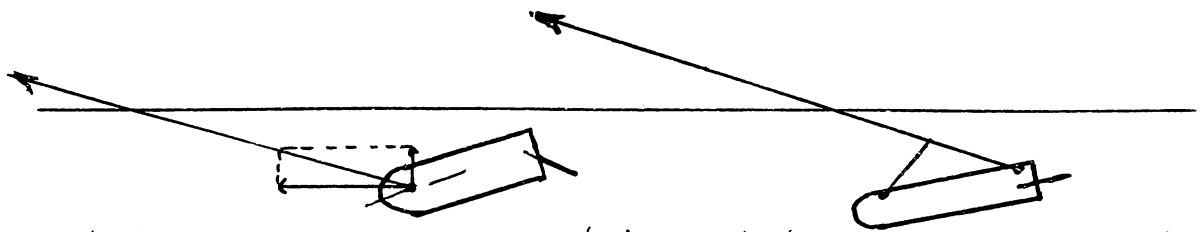
Le halage funiculaire consiste à placer le long de la rive un câble sans fin, supporté par des poulies ou galets et animé mécaniquement d'un mouvement continu de translation. On y attache la corde de halage. Ce système, théoriquement très simple, présente des difficultés particulières. D'abord, la tendance au défillement à cause de la traction oblique de la corde de halage, ensuite le vrillage ou mouvement continu de rotation du câble rond qui tend à enrouler la corde de halage et enfin le passage de l'attache de la corde sur les poulies. Une première application assez ancienne en a été faite en France, d'après les dispositions de M. H. Maurice Levy. Des perfectionnements très importants ont été apportés récemment au système par la Compagnie générale électrique de Nancy et des applications du nouveau système ont été faites dans les souterrains des canaux de l'Est français; elles semblent donner satisfaction. Mais leur application paraît destinée réservée à des circonstances très spéciales. (Voir "Canaux", par Jacquinet et Galliot et les travaux des Congrès de Londres 1923 et du Caire 1926).

Le halage se fait généralement sur une rive. En cas de trafic très considérable, il y aurait intérêt à l'effectuer sur les 2 rives, on éviterait ainsi les sujétions de croisement. Au croisement, le bateau le plus éloigné de la rive fixe le câble de halage au mât. La même manœuvre s'effectue au triemâtage (dépassement en marche). En marche normale, la corde est fixée au mât de canal, potelet de 2 m. de hauteur environ, établi à chaque bord vers l'avant du bateau;



ou bien à un bolard à l'avant du bateau, selon la hauteur relative du chemin de halage et du bateau. On cherche à réduire le plus possible la longueur de la corde, afin d'augmenter l'effet utile de la traction, sans augmenter trop l'obliquité, afin d'éviter que le bateau ne soit tiré à la rive. Il en résulte que

le bateau doit être tenu un peu obliquement par rapport à la rive, soit par le gouvernail, soit par une attache double à l'avant et à l'arrière. La



résistance de traction en est augmentée. Il faut éviter aussi, en marche normale, les trop grandes obliquités sur l'horizontale, aussi recommande-t-on de ne pas établir le chemin de halage à plus de 2,50 m. au dessus du plan d'eau.

Les cordes doivent traîner aussi peu que possible sur le sol et l'arête des berges et pouvoir franchir les obstacles. On place parfois des lisses de crête en bois; les garde-corps sont terminés par des lisses arrondies. Aux courbes et aux ouvrages d'art, pour éviter le frottement des cordes sur le sol ou sur les arêtes, on place des rouleaux verticaux ou, de préférence, on remplace les arêtes par des arrondis en tôle d'assez grand rayon. Dans la traction mécanique, il faut choisir judicieusement la hauteur du point d'attache en tenant compte des circonstances exposées ci-dessus.

La question du halage et de la traction en général ne peut pas se juger uniquement du point de vue technique. Elle dépend essentiellement des conditions très particulières de la navigation et des habitudes de la batellerie.

Des règles simples et fixes ne peuvent être énoncées, par suite de l'irrégularité et de la précarité de l'exploitation, et aussi de la diversité très grande des circonstances. Le développement des grandes sociétés de navigation, dont la concurrence menace fortement les bateliers isolés; la création de flottes industrielles par les grandes entreprises etc, ainsi que la tendance qui se manifeste partout en faveur d'une exploitation plus rationnelle et coordonnée des voies d'eau dans le cadre d'une coordination générale des moyens de communication, peuvent avantageusement modifier ces particularités. Mais les progrès dans ce domaine sont nécessairement très lents. La question des moyens de traction reste donc surtout dépendante des circonstances particulières. Plus le trafic est grand et constant, plus les moyens de traction doivent et peuvent être perfectionnés. Ce sont surtout les systèmes exigeant des

installations fixes importantes qui réclament ces conditions favorables, ou bien des circonstances exceptionnelles: souterrains, passages rétrécis ou encombrés, fort courant, etc. Ces circonstances ne se présentent généralement que sur certains tronçons des voies navigables, d'où la diversité des méthodes de traction qui assure la survivance du moyen ancien et peu coûteux, mais sûr, du halage par chevaux. Elle montre aussi l'avantage des porteurs automoteurs et des remorqueurs. Le monopole de traction est souvent nécessaire pour permettre la réussite d'une installation de traction. Cependant, un monopole ne peut être établi utilement que si le rendement en est assuré.

La question de traction, très intéressante certes, est donc surtout du domaine de l'exploitation et des détails dans son aspect technique. Je dois me borner aux généralités exposées ci-dessus; je renvoie pour plus de détails aux ouvrages spéciaux précités.

§ 6.) Touage. - Le touage sur chaîne ou câble moyé se fait à l'aide d'une chaîne (ou câble) reposant sur le fond de la voie d'eau et fixée aux deux extrémités. La chaîne est enroulée sur des poulies fixées au toueur et mues par des moteurs à vapeur ou électriques. Ce système convient surtout pour développer de grands efforts de traction, notamment pour la remonte des rivières à courant rapide, ainsi que le passage des détroits dans les canaux. Il existe en France des installations déjà anciennes et qui donnent satisfaction. Au canal de St-Quentin, l'exploitation se fait en navette par trains de 20 à 40 bateaux, à la vitesse de 1 à 2 km/h.

Économiquement, le système demande un trafic intense et très régulier, le rayon d'action de l'engin étant fixe et limité. Dans ce système de traction comme dans tous ceux qui prennent appui sur des points fixes indépendants du cours d'eau, la puissance effective est $\mathcal{E} = T v$, T étant l'effort de traction, v la vitesse absolue. Elle est égale à la puissance utile, le rendement commercial est le rapport de cette puissance utile à la puissance motrice indiquée. Dans le cas considéré, il n'est donc pas directement dépendant de la vitesse du courant. Il est en moyenne de 60 à 65%, ce qui est très élevé et beaucoup supérieur au rendement des remorqueurs. En effet, la puissance effective d'un remorqueur est $\mathcal{E}_0 = T (v + v')$, v' étant la vitesse

du courant. Si P_0 et P , E_0' et E' sont les rendements mécaniques et les puissances utiles d'un remorqueur et d'un tonneau développant une même puissance totale, on a: $\frac{T}{T_0} = \frac{E'}{E_0'} = \frac{P}{P_0} \frac{(v+v')}{v} = \frac{2(v+v')}{v}$, car $P = 2P_0$ environ.

Les tonneaux électriques du canal de St Quentin ont une puissance de 52 C.V. sous 605 volts et développent des efforts de traction atteignant jusqu'à 6000 kg aux vitesses indiquées. Certains tonneaux français ont des poulies d'enroulement à adhérence magnétique (système de Bouet).

Sur le Rhône, dans un tronçon à pente de 0,775 m/km, le câble s'enroule à la remonte sur un tambour porté par le bateau. C'est le tonnage par relais.

La puissance est de 150 C.V., permettant la traction d'un train de 750 t. de charge utile.

§7. Remorquage.

Le système mécanique le plus répandu et qui semble le mieux convenir aux circonstances diverses et variables de la navigation est celui du remorquage, malgré le rendement commercial médiocre de 20 à 25%, d'autant plus faible que le courant est plus fort. Il est en effet égal à $\frac{Tv}{T(v+v')} = \frac{Pv}{P(v+v')}$. Or, le rendement mécanique d'ensemble est faible, à cause du propulseur: hélice ou roues à aubes.

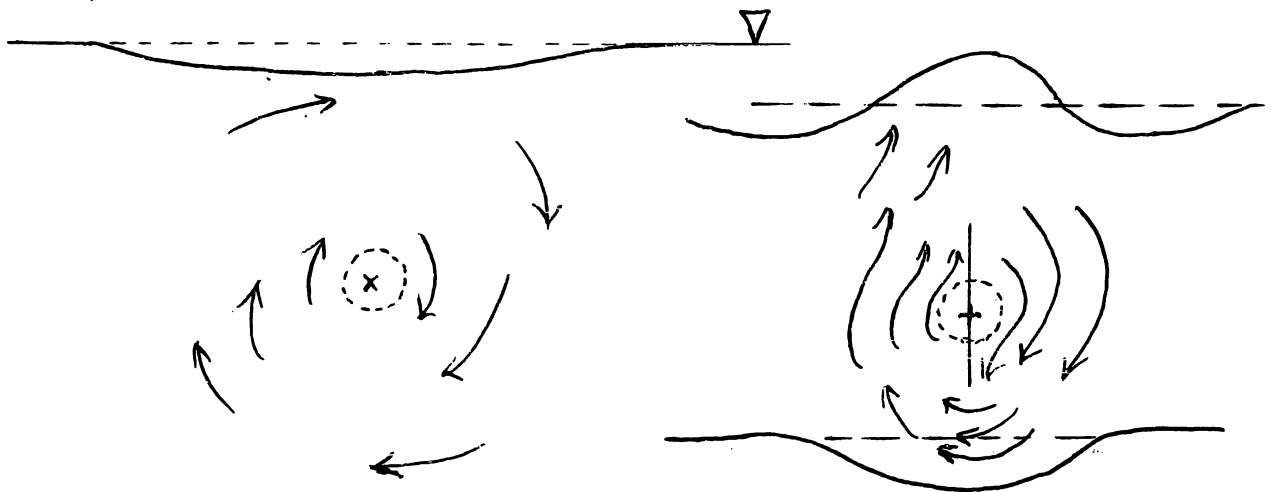
Mais le remorqueur est susceptible d'aider le bateau partout et en toutes circonstances; sa mobilité lui permet de suivre le trafic, souvent variable. Le remorqueur a pris un développement considérable. Il constitue le grand auxiliaire de la navigation, non seulement dans les ports, mais sur les grands cours d'eau navigables à grand trafic: Rhin, Danube, Seine, Meuse, etc. Très répandu sur les canaux, il est susceptible d'y réussir en cas de fort trafic. La puissance des remorqueurs de rivière est élevée, en moyenne de 350 C.V. environ. L'ordinaire dépasse 1000 C.V. et atteint jusqu'à 2000 C.V. (Rhin). La vitesse relative est de 7 à 8 km/h. La puissance nécessaire est d'environ 0,2 à 0,4 C.V. par tonne utile remorquée, selon la vitesse relative.

Sur les canaux, de telles puissances et vitesses sont inadmissibles, à cause des dégâts causés aux berges et au fond par les remous dans le passage à grande vitesse des trains de bateaux.

Le remous superficiel provoque des affouillements à la ligne d'eau et exige des revêtements. L'effet de la vitesse de marche est prédominant et les remorqueurs navigant à vide à grande vitesse sont les plus défavorables à ce point de vue. Il faut réglementer la vitesse de marche.

L'action sur le fond provient de l'érosion par les filets liquides mis en mouvement de rotation transversal sous l'action de l'hélice. C'est une espèce de tourbillon dont les vitesses décroissent en raison inverse de la distance à l'axe.

La vitesse sur le fond devrait donc être assez faible. Mais si le gouvernail se trouve dans l'axe derrière l'hélice, il arrête le mouvement de rotation et dévie les filets liquides animés de grandes vitesses, d'une part vers le fond et d'autre part vers le haut.



Ce sont les remorqueurs à une hélice et à gouvernail unique derrière l'hélice qui dégradent le plus le fond des canaux, leur puissance ne peut dépasser 50 à 60 C.V.

- Si l'on place deux gouvernails encadrant l'hélice ;
 - ou deux hélices latérales plus petites et un gouvernail central ;
 - ou l'hélice en tunnel Ehoengerofs ;
 - ou l'hélice unique avec le gouvernail avant l'hélice ;
 - ou le gouvernail à palette inférieure horizontale protégeant le fond du canal contre l'attaque des filets liquides ;
- on peut, sans dégradation appréciable, élever la puissance jusqu'à 100-120 C.V.

Il y a intérêt aussi à augmenter la profondeur de l'eau sous le remorqueur, donc augmenter la profondeur du canal (ce qui facilite la marche), à réduire

le tirant d'eau des remorqueurs et à leur donner des formes larges et affinées.

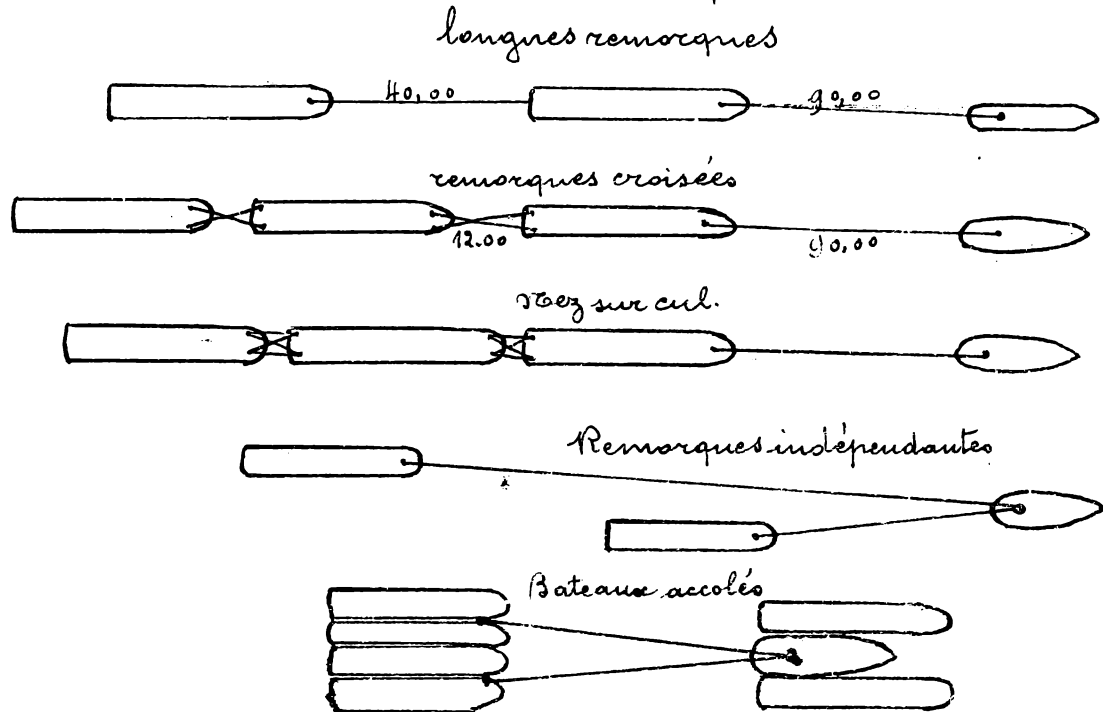
Les expériences faites sur le canal de Chaulerai avec un petit remorqueur électrique de 5 C.V. de formes très affinées, ont montré les résultats satisfaisants auxquels on peut arriver de cette manière. Le rendement a été de 32% à la vitesse de 3 km/h. A cause de l'inconvénient de la prise de courant par trolley, la propulsion électrique est supplantée par le moteur à explosion, semi-Diesel ou Diesel.

Mais les remorqueurs travaillent surtout en rivière parce qu'ils permettent la navigation en remonte même par les hautes eaux et réduisent donc les chômages. Ils peuvent traîner un train sur de très longs parcours.

Ils s'accoutument d'un trafic irrégulier tant en quantité qu'en destination, à cause de leur indépendance, ils supportent aussi de ce fait la concurrence. Les remorqueurs de rivières sont à vapeur, à hélices ou roues à aubes; ou à moteur Diesel ou semi-Diesel, dans ce cas à hélice.

Récemment on a construit des unités puissantes à hélices mues par turbines à vapeur.

Economiquement, le remorquage se fait par trains de bateaux, ce qui convient aussi beaucoup mieux dans les rivières que dans les canaux, tant à cause de la plus grande largeur que de l'absence ou de la plus grande distance des écluses. Les écluses pour trains de bateaux peuvent



donc le mieux au remorquage. Les écluses pour bateaux isolés font perdre du temps. Cependant, si le remorqueur est outillé pour aider à l'éclusage, l'inconvénient n'est pas capital (Ecran monté sur le pont).

A la remonte des rivières, l'attelage peut se faire à remorques croisées (courtes) ou même nez sur cul, ce qui réduit la résistance à la traction du train. On accouple parfois les bateaux transversalement (notamment sur le Danube où l'on forme des trains très importants). A la descente, on attelle à longues remorques ou à remorques indépendantes, pour faciliter les manœuvres, la résistance à la traction est maximum, mais cela n'a pas d'inconvénients en descente.

La capacité des trains dépend du type des bateaux, de la capacité des écluses, de la largeur du fleuve et du rayon des courbes, etc. C'est généralement 3 ou 4 bateaux, soit 1000 à 1200 t. en France et Belgique, 5000 à 6000 t. sur le Rhin. La vitesse a été indiquée, la puissance s'en déduit. Si v est la vitesse absolue de marche, v' celle du courant, la puissance a une expression de la forme: $P = K(v+v')^{2,25}$.

A cause des valeurs élevées de $(v+v')$, il y a intérêt à réduire K le plus possible par des bateaux de formes affinées.

Il faut évidemment considérer la valeur max. de v' . On en déduit que les mauvais passages, les rétrécissements, les ponts à faible débouché sont les éléments les plus défavorables au remorquage comme à la navigation.

Si les passages à très fort courant sont longs (rapides), le tonnage peut être plus adéquat que le remorquage dans ces parties de la voie.

§ 8.) Navigation automotrice.

Les auto-porteurs à vapeur se trouvent souvent sur les rivières, pour des services rapides de voyageurs et de messageries; ils sont d'ailleurs peu répandus.

Ils ont le défaut de réduire fortement la capacité utile (coefficient de déplacement 50%) et d'exiger une grande puissance (0,5 à 2 c.v. par t. utile).

On a pu améliorer le rendement commercial en agencant les auto-porteurs en remorqueurs; on réduit ainsi la puissance par tonne utile à 0,25 C.V.

Mais le grand intérêt de la navigation automotrice réside dans l'adaptation du petit moteur individuel robuste, simple et économique, au bateau de canal permettant la navigation à petite vitesse (3 km/h).

L'électricité présente l'inconvénient de la difficulté de distribution. Ce sont donc surtout les moteurs à combustion interne qui conviennent, principalement les semi-Diesel ou Diesel à huile lourde ou bien les moteurs à gazogènes. A ce point de vue, les essais de construction de canions à gazogènes de faible volume et grand débit sont très intéressants pour la navigation.

On peut estimer à environ 0,05 à 0,10 C.V. par t. utile la puissance nécessaire pour une vitesse de 3 km/h. dans un canal sans courant. Les avantages de cette navigation sont énormes surtout pour les voyages longs et réguliers et si les voies d'eau sont équipées pour des manœuvres rapides. Le parcours journalier moyen est doublé par rapport au halage par chevaux. Les bâteaux doivent être affinés à l'avant (étrave) et à fond relevé vers l'arrière pour faciliter l'arrivée de l'eau à l'hélice. Il y a avantage à les faire gros et courts; on réduit la résistance de frottement et la résistance de rencontre est faible, grâce aux formes.

§ 9.) Caractère économique des transports par eau, principalement sur les canaux.

Les transports par eau se distinguent par la faible résistance spécifique à la traction, de l'ordre de 1 à 2 millièmes de la charge utile, contre 1 à 2 centièmes pour les transports par fer et 5 à 10 centièmes pour les transports par route.⁽⁴⁾ Ils sont donc économiques, mais ils sont en même temps peu rapides. Un faible accroissement de vitesse augmente très considérablement les frais. Leur zone d'influence est très restreinte et limitée au voisinage immédiat des voies d'eau qui sont elles-mêmes généralement en réseau très peu serré.

Les transports par voie d'eau conviennent surtout aux matières brutes ou grossières non périssables, en vrac, dont le prix de transport par fer est très considérable par rapport à la valeur intrinsèque. Sauf cas spéciaux, la capacité de concurrence des voies d'eau se limite à ce genre de transport. Encore n'est-elle assurée incontestablement que pour de grandes voies d'eau naturelles permettant la grande navigation, comme le Rhin, le Danube, la Seine de Rouen à Paris, etc. Pour les canaux de navigation, le

.Voies navigables.

résultat est beaucoup moins certain. Les circonstances les plus favorables sont l'embranchement ou la jonction en relation avec des voies naturelles très fréquentées; la liaison de grands centres de production et de consommation ou d'entrepôt ou de transbordement, assurant un grand trafic. Encore dans ce dernier cas, est-il possible que le chemin de fer soit plus avantageux. D'autant plus que la navigation exige à l'heure actuelle pour son propre développement le concours du chemin de fer: embranchements d'apport et de transbordement.

Il faut observer aussi que, bien que la construction, l'entretien et l'exploitation des voies navigables entraînent des frais considérables, la navigation n'en supporte généralement qu'une infime partie, souvent moins du dixième, car il semble qu'une taxation équivalente aux frais d'exploitation de la voie d'eau serait prohibitive dans la plupart des cas. Le changement de cette situation privilégiée modifierait sensiblement la signification économique du transport par eau par rapport aux chemins de fer.

En conclusion, on peut dire que la construction de canaux de petite capacité, à faible trafic local et ne servant qu'à la navigation n'est, sauf cas exceptionnel, plus à envisager. Il en est de même de l'aménagement court-circuit de rivières naturelles peu navigables de faible importance. Sa route ou la voie ferrée sont préférables d'après l'intensité du trafic. Les cours d'eau naturels, naturellement navigables, ou qui peuvent être rendus aisément navigables, et dont le trafic est généralement assuré par l'attraction qu'exercent les cours d'eau sur la vie sociale, commerciale et industrielle, sont susceptibles d'une exploitation prospère au point de vue des transports. Il en est de même de certains canaux construits dans le passé, qui sont, en somme amortis et qui ont acquis un trafic régulier.

La construction de nouveaux canaux ne paraît plus justifiée que pour établir des liaisons importantes entre grandes voies d'eau: Danube - Rhin, Rhin - Rhône, Rhin - Meuse, Escaut - Meuse, etc. Ces voies doivent être nécessairement de grande capacité et, en vue de leur prospérité et réussite, on doit nécessairement s'inspirer plus que dans le passé de l'économie des transports. En même temps, il faut chercher à assurer

le rendement économique de l'entreprise.

D'une manière générale, il semble que la nouvelle orientation économique et le développement de la circulation sur routes rendent désirable une révision des conditions économiques de transport par eau, dans le sens d'une coordination de tous les moyens de transport et d'une répartition rationnelle des charges correspondantes.

§ 10) Caractères techniques des transports par eau, principalement sur les canaux.

Il faut favoriser le développement du matériel de grande capacité et la navigation par trains pour la réduction des frais de transport. L'augmentation des profondeurs est donc désirable. L'augmentation d'enfoncement des bateaux, même modérée, est susceptible d'augmenter beaucoup le rendement et de réduire les prix de transport (Voir H63 Savand, ouvrage cité).

Il faut assurer partout d'égales conditions de navigabilité. Les mauvais passages sont les plus grands obstacles à la navigation. Les courbes de petit rayon y sont assimilables, notamment à cause des difficultés qu'elles opposent à la navigation en trains.

En canal, la navigation ne peut guère se faire que par trains de 2 ou 3 bateaux.

Les écluses doivent être conçues pour écluser un train de composition courante (écluse polynefs). Une écluse mononef accolée sert éventuellement au passage des bateaux isolés. Les vents violents peuvent gêner énormément, même arrêter la navigation des bateaux vides. C'est un grand inconvénient qu'on peut réduire par la plantation de taillis serrés sur les deux rives des canaux.

En rivière, les modes de traction qui conviennent le mieux sont normalement le remorquage et le touage en rapides.

Sur les canaux, l'auto-propulsion est le moyen théoriquement le plus favorable, on y doit en somme assimiler les bateaux pourvus de chevaux de bord. Le halage mécanique par tracteurs à essence ou surtout par tracteurs électriques sur rails, éventuellement par câbles aériens (halage funi-

culaire) ou mouillés (tonnage), conviennent surtout pour les passages difficiles (souterrains, biefs étroits, etc) ou lorsqu'il s'agit d'écouler un trafic élevé. Mais l'emploi de moyens mécaniques quelconques de traction exige impérieusement l'équipement correspondant des voies d'eau: embranchements d'apport et de transbordement à grand débit, engins de manutention rapides, ports de garage, ouvrages d'art à gabarits larges, etc, de manière à supprimer les difficultés locales: passages étroits, retards dus au croisement de bateaux stationnant ou déchargeant en route, retards aux écluses, et surtout les retards aux points initiaux et terminaux, attentes de chargement et de déchargement. Ces pertes de temps souvent considérables rendent illusoire les avantages des moyens mécaniques et réduisent leur rendement économique au point que le halage par chaudière reste le moyen de navigation le plus répandu. Le progrès de la navigation et celui des voies d'eau doivent donc être coordonnés.

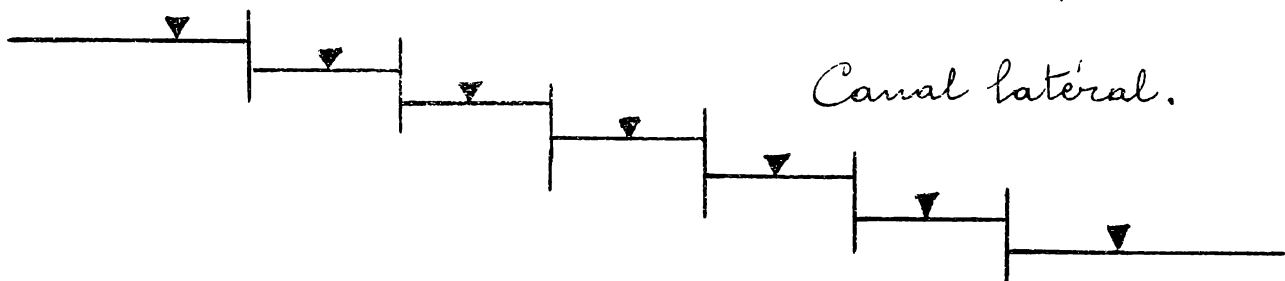
Chapitre II. Tracé et dimensions des canaux.

§ 1.) Généralités. En principe, un canal de navigation est une voie navigable artificielle sans couvert, composée d'un certain nombre de sections appelées biefs dont le plan d'eau est horizontal dans chacun d'eux, mais dont le niveau varie de l'un à l'autre. Les biefs sont séparés par des ouvrages de retenue permettant la navigation, c'est à dire assurant le maintien de la différence de niveau ou chute entre deux biefs contigus tout en permettant le passage des bateaux d'un bief à l'autre.

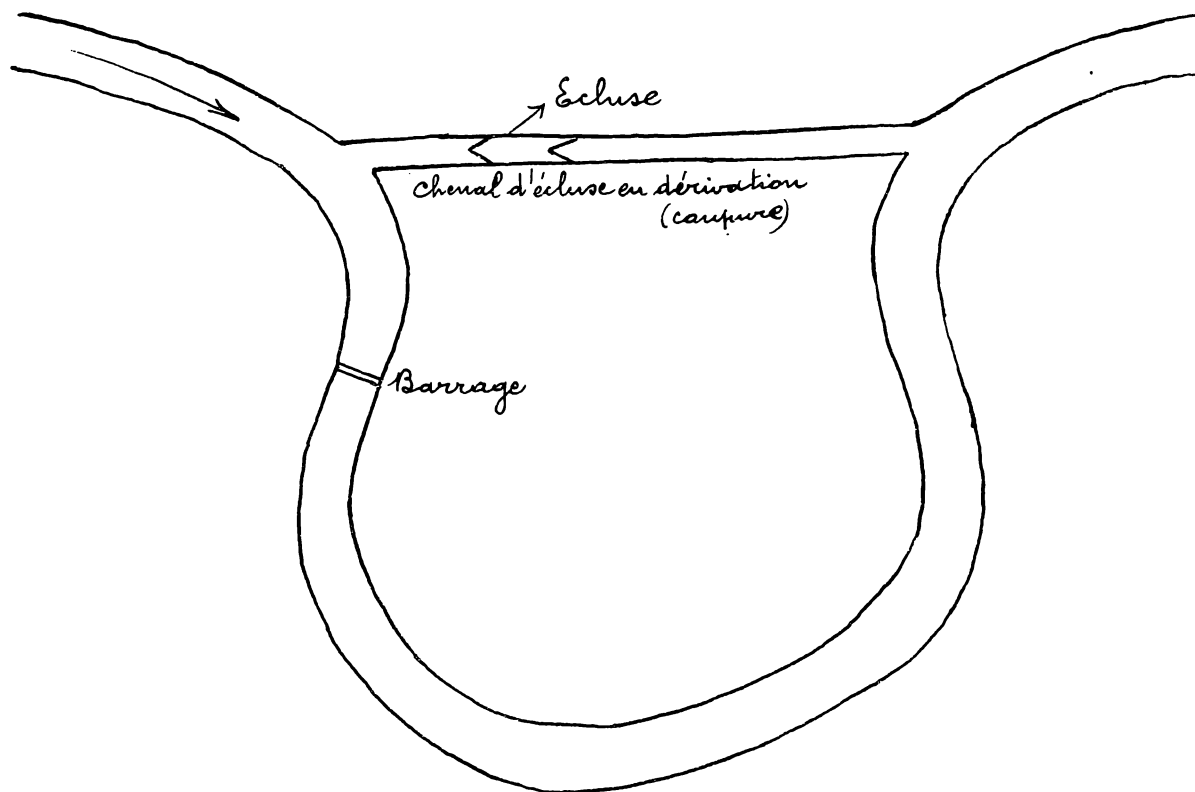
Ces ouvrages sont des écluses à sas.

Suivant l'étagement des biefs, on distingue les canaux latéraux et les canaux à point ou bief de partage.

Les canaux latéraux sont constitués d'une série de biefs dont les niveaux



au flottage : sons descendent constamment d'un bief supérieur vers un bief inférieur. Leur nom provient de ce que généralement ils établissent la jonction entre un point amont et un point aval d'un cours d'eau naturel non navigable ou non aménagé pour la navigation (Ex : Canal de Liège à Hoesbriicht, latéral à la Meuse; Canal d'Alsace projeté, latéral au Rhin, etc). Mais ce caractère n'a rien d'absolu et des canaux d'un autre genre possèdent les caractères principaux des canaux latéraux, par exemple :



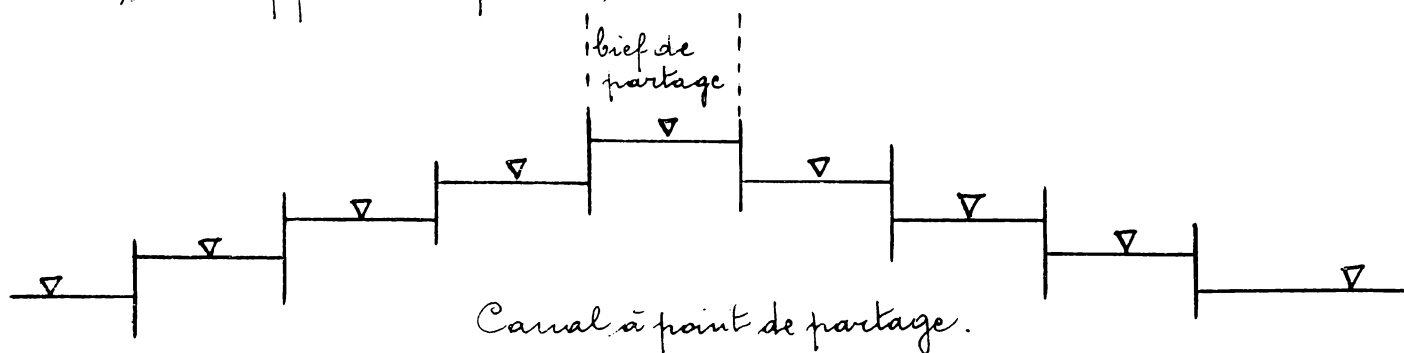
(1) les canaux d'embranchement à un ou plusieurs biefs régulièrement étagés, desservant des centres industriels ;

(2) les canaux des plaines basses maritimes, à biefs uniques ou peu nombreux (Ex : canaux de Gand à Bruges et à Ostende, de Furnes à Dunkerque et de Furnes à Griepport, canal de Passchendaele, etc).

(3) Au point de vue des caractéristiques, on peut aussi leur assimiler les canaux ou chenaux de dérivation ou de coupure dans lesquels s'établissent parfois les écluses des rivières canalisées.

Les canaux à point ou bief de partage réunissent deux biefs inférieurs, généralement en relation avec des voies navigables naturelles, en franchissant la ou les crêtes de partage qui les séparent et qui déterminent la constitution

de biefs supérieurs au biefs de partage. Ces biefs de partage sont fréquemment en souterrain dans les pays accidentés; cette disposition est presque générale dans les régions de l'Est et du Centre français. Dans les pays de plaines (Belgique, Pays-Bas, Nord français, Allemagne du Nord), les biefs de partage sont généralement à ciel ouvert, ce qui est un grand avantage car les biefs souterrains présentent de considérables inconvénients au point de vue de la construction, de l'entretien et de l'exploitation, aussi que de la navigation. Bien qu'on entende généralement par bief de partage un bief plus élevé que ses voisins, on peut aussi considérer comme bief de partage inférieur, un bief plus bas que ses voisins.



§ 2) Importance des chutes et longueur des biefs.

Il est apparent qu'à ce point de vue les canaux à points de partage présentent des différences essentielles.

Dans les canaux latéraux, la différence des niveaux extrêmes du canal est déterminée en principe par la pente du cours d'eau latéral; elle est toujours faible par rapport à la longueur et généralement inférieure au $1/1000^{\circ}$. L'ordre de grandeur de la longueur des biefs peut dépendre uniquement de la hauteur de chute moyenne adoptée. Les écluses anciennes étaient toujours à faible chute, à cause des difficultés constructives des écluses à forte chute. Mais cela conduit à multiplier le nombre des ouvrages, qui ont le double inconvénient d'être coûteux de construction et d'exploitation et d'entraver la navigation. Aussi, les hauteurs de chute adoptées n'ont-elles cessé de croître avec les progrès de la technique et il y a intérêt aussi pour les canaux latéraux de les prendre aussi grandes que possible, ce qui réduit le nombre des biefs en allongeant leur longueur.

Mais outre les difficultés constructives à vaincre pour le rachat des fortes

chutes, une autre circonstance peut intervenir pour les limiter, c'est l'importance des terrassements et, particulièrement dans le cas des canaux latéraux, la difficulté d'établir de longs biefs en remblai. L'importance des terrassements augmente le prix du canal; les difficultés et les dépenses d'étanchement peuvent être grandes, d'autant plus que le tracé se trouve le plus souvent dans les terrains d'alluvion de la vallée, en général peu favorables. Il faut tenir compte aussi de l'influence du canal sur les eaux souterraines et de surface, notamment de la nécessité de livrer passage aux émissaires des eaux de ruissellement des versants de la vallée et de ne pas restreindre dangereusement le lit d'inondation.

On voit donc que dans le cas d'un canal latéral, il y a généralement des circonstances techniques et économiques antagonistes, qui déterminent une solution optimum. Théoriquement, le problème est donc assez simple et il est apparent que généralement la solution est donnée par des biefs de longueur moyenne et à chutes moyennes. Une chute de 6 m. et une pente kilométrique de 50 cm. (0,005) correspondent, par exemple, à une longueur de bief de 12 km.

Naturellement, les emplacements des écluses et, partant, les longueurs réelles des biefs dépendent des circonstances locales.

Les circonstances peuvent être souvent plus de latitude pour les canaux d'embranchement, généralement courts d'ailleurs et le problème devient tout à fait simple pour les canaux dans les plaines maritimes basses si il est souvent possible d'avoir un nombre très réduit de biefs ou même un seul avec de faibles chutes. Lorsque le bief aval est contigu à un cours d'eau ou bassin à marée, il faut nécessairement tenir compte des fluctuations du niveau aval pour la détermination de la chute.

Le problème est évidemment en principe plus complexe pour les canaux à point de partage. Les niveaux des deux biefs extrêmes ne sont déterminants qu'en regard de leur différence avec le niveau du point de partage, qu'il y a intérêt à réduire autant que possible. Le nombre des variables du problème est donc beaucoup plus considérable, les fondamentales sont: les points extrêmes, le point de franchissement de la ou des crêtes et le trajet suivi entre

ces points. C'est à dire que l'échelonnement des biefs dépend du tracé, comme il est évident. Mais d'autre part, il faut avoir égard si cet échelonnement dans la détermination du tracé, les deux questions sont indépendantes.

Quoiqu'il en soit, les pentes du tracé sont généralement plus élevées que dans les canaux latéraux, surtout aux environs du point de partage.

Donc, à chute égale, les biefs sont plus courts, les écluses plus nombreuses.

Les chutes réduites des anciens canaux conduisaient parfois dans les fortes déclivités à des successions de biefs très courts, de quelques centaines de mètres, que l'on appelait des cellules d'écluses et qui, dans les cas extrêmes, devenaient des sas d'écluses accolés. De tels dispositifs constituent des gênes considérables pour la navigation et on y substitue à l'heure actuelle des écluses à forte chute, allant jusqu'à 20 m., avec des biefs de longueur correspondante. Ces hauteurs de chutes ou de plus grandes encore, que l'on peut se proposer à l'heure actuelle de racheter par des échelles d'écluses ou des appareils mécaniques, sont toutefois exceptionnelles. Mais on peut considérer que, en moyenne, les canaux à point de partage présentent des hauteurs de chute supérieures à celles des canaux latéraux et moins uniformes, en ce sens qu'elles dépendent plus de la configuration du terrain. Les chutes de 8 et 10 m. ne sont plus considérées comme exceptionnelles pour les nouveaux ouvrages. Il est apparent qu'en terrain décliné, la limite économique de chute, en tenant compte des terrassements, est plus élevée que pour les canaux latéraux et même qu'en cas de très forte déclivité, elle peut dépasser les limites pratiques.

§ 3.) Profils en long - Canaux à courant.

Le profil en long d'un canal présente donc une succession de gradins, représentant l'axe du plafond du canal, les ressauts étant au droit des têtes amont des écluses.

Généralement, les canaux de navigation sont sans courant appréciable et les divers gradins du profil en long sont horizontaux. Les plans d'eau sont en principe horizontaux, mais le débit d'alimentation, d'ailleurs faible, et qui peut remonter d'aval en amont, peut créer une très légère pente superficielle.

Cependant, dans certains cas, des canaux de navigation ont un débit

intermittent ou constant. Certains canaux de navigation assurent en même temps l'office de canal de dérivation, d'assèchement ou d'irrigation, avec des débits variables selon les saisons et généralement modérés.

Ces débits peuvent devenir importants lorsque les canaux servent de décharge pour l'écoulement de certaines crues, ce qui est fréquent pour les canaux latéraux. Ainsi le nouveau canal de Charleroi à Bruxelles, qui n'est pas un canal latéral, mais dont une partie est voisine de la Senne, servira à l'écoulement des têtes de crues de cette rivière en aval de Clabecq, avec un débit maximum déterminé.

Enfin, un aspect nouveau de la question est celui de l'utilisation des chutes des canaux latéraux pour la production de force motrice, le canal doit alors dériver un débit important du cours d'eau. Tel est le projet du grand canal d'Alsace latéral au Rhin.

Lorsque le débit est assez important, il convient de donner une pente au plafond, correspondant au mouvement uniforme. Cette pente et la section correspondante doivent d'ailleurs être telles que la navigation soit gênée aussi peu que possible par le courant, compte tenu des autres aspects du problème.

§4.) Cunette de navigation des canaux.

Dans le cas d'un canal sans courant, la section mouillée est déterminée par le type du bateau maximum auquel le canal doit livrer passage.

Généralement, en section courante du moins, le canal est à double voie, c'est à dire permet le passage d'un bateau dans chaque sens. La largeur au plan d'enfoncement maximum doit donc être égale à deux fois la largeur du bateau plus le jeu intermédiaire et les jeux latéraux en alignement droit.

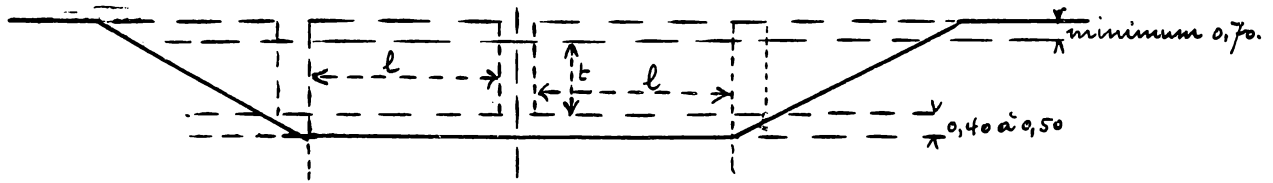
En France, pour les bateaux de 300^T, on admet $L = 2 \times 5,00 + 3 \times 0,70 = 12,10 \text{ m.}$

En Allemagne, pour les bateaux de 600^T. $L = 2 \times 8,00 + 2,00 + 2 \Delta L$

" " " " 1000^T. $L = 2 \times 9,20 + 2,00 + 2 \Delta L.$

Il faut également une certaine épaisseur d'eau sous le bateau et nous avons vu qu'il y a intérêt, pour la facilité de la navigation, d'augmenter l'excès du mouillage sur le tirant d'eau. Pour des raisons d'économie

des terrassements, on se borne généralement, en déblai, à 0,40 ou 0,50 cm. La profondeur normale des canaux est ainsi 2,20 m. pour les bateaux de 300 et de 600 T et de 3,00 m. pour les bateaux de 1000 T. (Enfoncement 2,40 m.).



Ses éléments essentiels de la section sont ainsi déterminés. Si l'on choisit la section la plus simple, de forme trapézoïdale, il suffit de donner l'inclinaison des talus, généralement 2 : 1 et la revanche du chemin de halage par rapport au plan d'eau, dont le minimum est 0,70 cm. et que l'on préfère à 1,00 m. en vue de permettre un relèvement éventuel du plan d'eau. On peut alors effectuer tout le tracé et on voit que, d'après les dimensions précitées, la largeur au plafond en alignement droit est généralement voisine de deux largeurs de bateaux.

Cel est le schéma de la cuvette d'un canal en alignement droit. Si, par suite de stationnements industriels ou de garages, un plus grand nombre de bateaux peuvent se trouver en ligne dans une section, il faut ajouter pour chaque bateau une largeur égale à la somme plus le jeu. Le jeu de 0,70 qui convient pour les bateaux de 300 T halés par chevaux est tout à fait insuffisant pour des bateaux plus grands et pour une traction accélérée; il est recommandable d'envisager 2,00 m.

De même, l'excès de 0,40 à 0,50 de maillage sur le tirant d'eau est faible, d'autant plus que la modification du profil par l'action de l'eau peut le réduire. Des épaves ou objets jetés sur le fond peuvent abîmer le fond des bateaux. Il est recommandable d'élever cette revanche à 1,00, ce qui est tout à fait satisfaisant pour la navigation. En remblai, rien ne s'oppose même à choisir 1,50 m., ce qui réduit le cube de remblai.

Ainsi donc, les tendances modernes consistent à augmenter l'aisance des sections, ce qui améliore sensiblement la navigabilité.

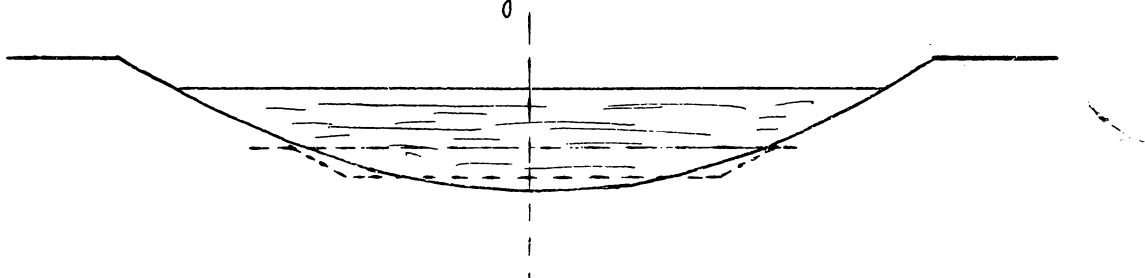
Alors que dans les anciens canaux français, $n = 4$ en moyenne et pouvant descendre jusqu'à 3, on doit considérer 5 comme la valeur

convenable pour les nouveaux projets. C'est surtout l'augmentation de profondeur qui est intéressante, car elle permet éventuellement une augmentation du tirant d'eau, ce qui, d'après M. L. Louard (Étude économique, technique et réglementaire de l'exploitation et de la traction mécanique des bateaux sur les fleuves et canaux. - Ed. par l'A. I. P. C. N.) permet d'augmenter beaucoup l'économie des transports par eau.

Des auteurs allemands ont étudié la valeur économique de n en tenant compte des frais de construction pour diverses sections et des frais de traction à diverses vitesses. Ils ont trouvé qu'il existe un minimum correspondant à une valeur de n comprise entre 4 et 5 et une vitesse comprise entre 4 et 5 km/heure (pour des bateaux de 600 T).

Les ingénieurs français en sont restés longtemps au profil trapèze ci-dessus défini, avec des de 0, 20 cm. un peu au dessus de la flottaison, dont la raison d'être sera exposée plus tard. Ce profil n'est pas stable. Même en l'absence de courant, le mouvement des bateaux crée des vitesses. L'action de l'eau, de l'agitation due à des causes diverses, des coups de gaffes, etc, transforme avec le temps ce profil en un profil contenu en cuvette concave.

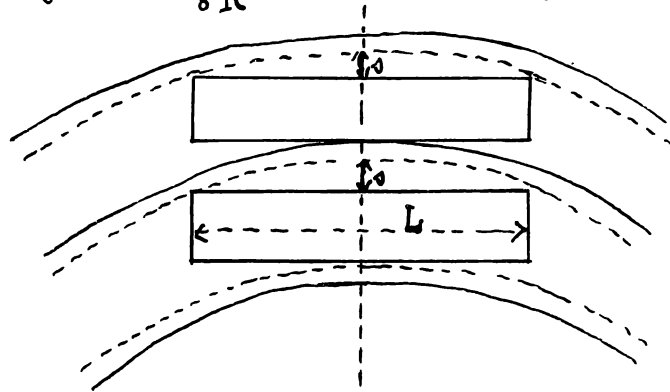
Pour cette raison, les Allemands ont depuis de nombreuses années déjà adopté le profil polygonal se rapprochant du profil rationnel d'équilibre des talus maillés. Il a l'avantage de donner plus de profondeur dans l'axe et il est possible de le tracer de telle sorte que la section de déblai par rapport au trapèze ne soit pas sensiblement plus grande. Ses expériences sur modèles réduits ont montré que généralement la section en cuvette est la plus favorable pour la traction des bateaux. Ses ingénieurs français semblent s'être ralliés à cet avis M. M^{rs} Jacquinet et Galliot font la proposition très judicieuse de conserver jusqu'au plan d'enfoncement maximum les talus anciens à 2:1 et de substituer au trapèze inférieur un arc de courbe symétrique de même aire et se raccordant tangentielllement aux deux extrémités.



Dans la traversée des villes et des agglomérations industrielles, il est nécessaire d'établir des murs de quai, pour des raisons de manutention, ou d'esthétique et pour réduire la largeur des emprises. La largeur de la section rectangulaire se détermine, comme ci-dessus par le gabarit des bateaux. Pour compenser la réduction de section, il est recommandable d'augmenter un peu la profondeur.

Les garages et ports devraient, pour gêner le moins possible la navigation, être constitués par des bassins greffés sur le canal. S'ils sont établis en canal, ce doit être sur la rive opposée au halage et il faut donner les surlargeurs correspondantes.

En courbe, il faut donner, pour permettre le croisement des bateaux, une surlargeur qui dépend du rayon de la courbe sur l'axe et qui devient insensible pour les courbes de grand rayon. On voit que pour conserver la même aisance de croisement et éviter la superposition des routes, il faut pour chaque bateau une surlargeur de $\frac{L^2}{8R}$, L étant la longueur du bateau, R le rayon.



Pour le bateau de 300T, $L = 38,50$ et la surlargeur serait d'environ $\frac{380}{R}$ (formule française) Mais pour tenir compte des effets de la force centrifuge, des difficultés de manœuvre, etc, pour les nouveaux canaux français on adopte $\frac{700}{R}$ et on admet qu'au delà d'un rayon de 1000 m., l'élargissement est superflu.

Pour le canal EMS - Weser, pour bateaux de 600T on a

R =	500-700	700-900	900-1200	1200-1500	1500-2000
surlargeur	5	4	3	2	1

Pour suite de l'obliquité, les efforts de traction sont fortement accrus en courbes de petit rayon. Comme limite inférieure de rayon, on admet actuellement 300 m. en France pour les bateaux de 300T. Les Allemands considèrent

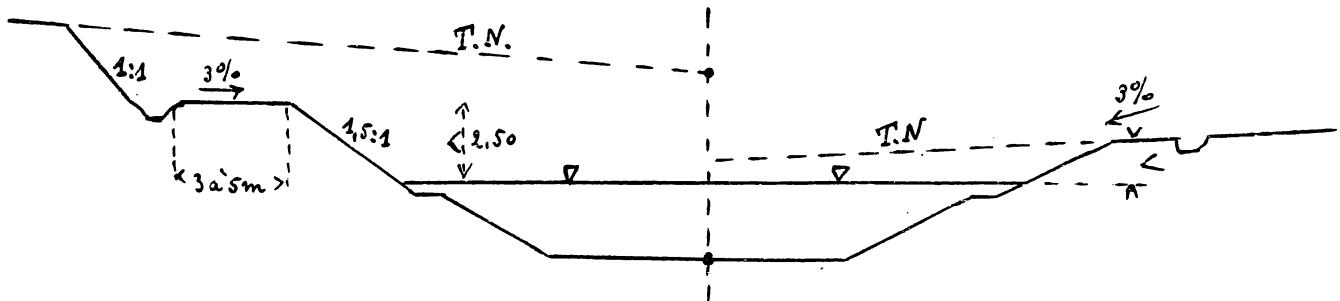
que pour les bateaux de 1000T, il ne faut descendre qu'exceptionnellement en dessous de 1000 m.

§ 5.) Profils en travers.

Les profils en travers sont déterminés par la combinaison de la section mouillée du canal avec les profils en travers du terrain naturel, d'après les cotes du profil en long.

Le profil le plus courant est le profil en déblai ou tranchée. Outre la section mouillée, il comporte le chemin de halage sur une rive et généralement, sur l'autre rive un chemin de contre halage ou marchepied et les talus dont l'inclinaison au dessus de la flottaison dépend de la nature du terrain et de la hauteur. Le minimum exceptionnel de largeur du chemin de halage est 2,00; il ne permet même pas le croisement des chevaux attelés en couple et il est insuffisant pour l'établissement éventuel de la traction mécanique. Il est préférable de donner 3 à 5 m. de largeur. Si la largeur dépasse 3 m., il n'est pas utile d'empierrement ou d'aménager le chemin de halage sur plus de 3,00 m.

Le chemin de halage est au niveau du terrain naturel si sa hauteur au-dessus du plan d'eau est inférieure à 2,50 m., sinon on l'exécute en déblai.



Il est recommandable de le border d'un petit fossé extérieur, au moins lorsqu'il est en tranchée; les eaux sont évacuées de distance en distance vers le canal par des échancrures en drain. Le contre halage n'est généralement pas aménagé et peut être moins large que le halage (2,00). Cependant, la section est généralement symétrique. La pente transversale vers le canal est d'environ 3%.

D'une manière générale, il est recommandable de ne pas être mesquin dans la détermination des largeurs d'emprises, afin de réserver l'avenir. La tendance moderne consiste même à étendre les emprises sur une certaine largeur de part et d'autre de l'assiette du canal, en vue de leur location en revendu comme terrains industriels. Cette opération généralement avantageuse

favorise le développement industriel de la région traversée et le trafic du canal et peut compenser une partie notable des frais d'établissement et d'exploitation.

Cette tendance est une manifestation de celle plus générale d'établir l'exploitation des canaux sur une base économique industrielle, à quoi j'ai fait allusion plus haut. Mais il faut alors que les rives du canal suivent assez sensiblement le terrain naturel, afin de permettre un raccordement facile des terrains riverains et il est nécessaire aussi que le canal soit bordé d'une voie ferrée.

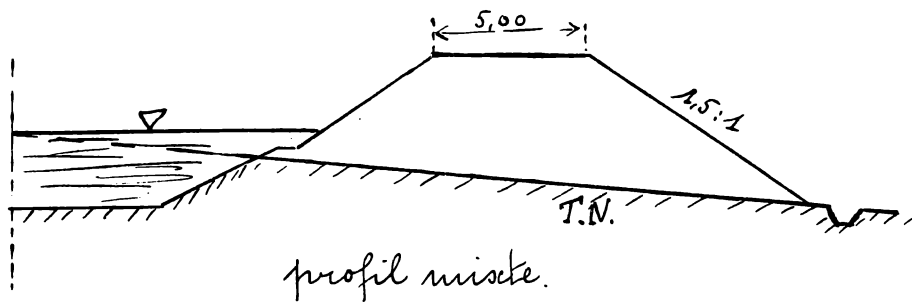
Un tel canal est dit "de trafic", par opposition à un "canal de transit", qui traverse une région sans la desservir et dont le niveau est donc fixé par des conditions différentes, généralement d'ordre technique.

Les profils totalément en remblai se présentent peu fréquemment, dans le cas de fortes chutes, plus souvent dans la traversée de vallées. La cote du plafond sur l'axe est encore déterminante. La cote du couronnement est déterminée par la revanche des digues sur la flottaison normale. Il est évidemment nécessaire, pour des raisons de sécurité, de dépasser le minimum de 0,70 m. et le maximum est de 2,50 m. imposé par le halage. Pour des raisons d'économie, on restera en dessous du maximum et la revanche de 1,50 m. adoptée pour le canal de l'Embs à Doctmund (bat. de 600 T.) paraît suffisante. Pour assurer une sécurité suffisante, on adopte généralement une largeur de couronnement de digue de 5,00; sur l'une d'elles on aménage le chemin de halage, qui peut donc être large.

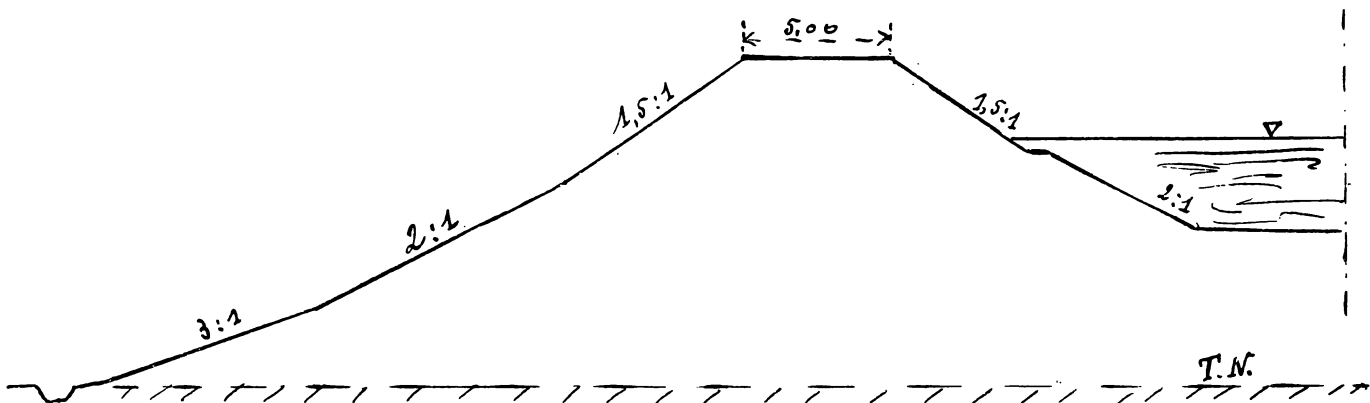
La largeur d'emprise se détermine alors aisément par les talus du remblai. Comme, malgré les précautions d'étanchement, il faut prévoir quand même des infiltrations dans les terres et que, d'autre part, un éboulement de remblai de canal est un accident particulièrement grave, les talus extérieurs reçoivent une inclinaison inférieure à celle des talus de même hauteur des voies de terre. Pas moins de 1,5 : 1 pour les faibles hauteurs, plus généralement 2 : 1 et même des talus concaves d'inclinaison décroissante pour les grandes hauteurs (> 10 m). Aux pieds des talus, on établit des fossés ou mieux des drains pour recueillir et évacuer les eaux de ruissellement et d'infiltration.

Le profil mixte est plus fréquent, surtout pour les canaux latéraux. La

cuvette est partiellement enterrée. La hauteur et la largeur des digues se déterminent comme ci-dessus. Par suite des faibles hauteurs, les talus extérieurs



peuvent être inclinés à 1,5 : 1, parfois 2 : 1, surtout si les talus peuvent être mouillés. Il faut également prévoir le drainage de pied. (Voir plus loin les profils du nouveau canal de Charleroi à Bruxelles pour bateaux de 600 T, chap. VI.)



§ 6.) Profils spéciaux.

Comme nous avons indiqué déjà que dans la traversée de villes ou d'agglomérations industrielles, des raisons spéciales imposent parfois la section mouillée rectangulaire. Il faut toutefois que le halage ne soit pas interrompu et il faut éviter autant que possible de faire changer le halage de rive ou d'établir le halage sur chaussée. On établit donc une berme de halage au pied d'un des murs; il est recommandable de ne pas donner moins de 2,5 m. de largeur.



Si l'espace disponible est moins mesuré, on peut aussi établir le profil mouillé normal, la tranchée étant bordée de murs de soutènement ordi-

naires réservant entre leurs pieds et les berges des bermes de largeur suffisante. Ce dispositif est fréquent dans la traversée des villes, pour des raisons d'aspect et de voirie.

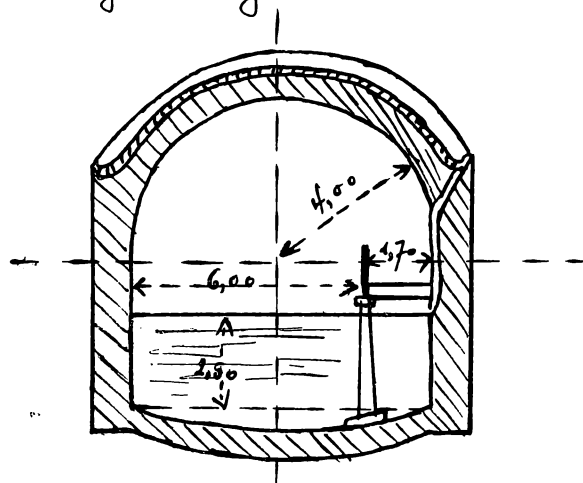
Ces profils sont aussi ceux qui conviennent pour le passage sous les ponts; le premier réduit sensiblement la portée et est donc généralement préférable. Il réduit aussi la section manillée, mais nous avons vu qu'on peut y remédier.

Une condition essentielle à respecter est de ne pas réduire le gabarit de passage des bateaux sous les ponts. Il faut en outre respecter le gabarit des bateaux au dessus de l'eau et celui du chemin de halage. En France, on prescrit comme tirant d'air des bateaux vides de 300T une hauteur de 3 m 70 au dessus de la flottaison; en Allemagne, 4,00 pour les bateaux de 600 et 1000T. Pour le nouveau canal de Charleroi à Bruxelles pour les bateaux de 600T, on a fixé 4,50 m. Ce sont évidemment des minima. Pour la hauteur du halage, 2,75 m. en France, 3,00 m. en Allemagne. Ces dimensions sont suffisantes.

Pour la sécurité et la facilité de la navigation, les raccordements des sections différentes seront faits progressivement par des murs ou percés gauches.

On n'admet plus, à l'heure actuelle, le rétrécissement de la section sous les ponts; on s'efforce au contraire d'augmenter le débouché des anciens ponts à faible ouverture.

En région minière, il faut tenir compte des affaissements, tant pour la fixation des flottaisons que pour la revanche des digues, que l'on augmente, ainsi que pour la profondeur, que l'on augmente également.



Section du souterrain de Balesmes (Canal de la Marne à la Saône).

§ 7. Souterrains.

Des sections très particulières sont celles des souterrains. Dans les anciens

souterrains français, la section est à simple voie. La section type a 10 m. de largeur et 2,50 m. de tirant d'eau, une banquette de 1,40 m à 2,00 m. permet le halage. L'ouverture du tunnel est donc de 8 m. et la hauteur totale est d'environ 8,00 m. Le rapport n est donc très petit, voisin de 1,7 et la navigation est très difficile, surtout s'il y a un courant d'alimentation.

Dans les souterrains plus récents, comme celui du canal de la Harne à la Saône à Balesmes, une amélioration au point de vue de la navigation est réalisée par l'utilisation de toute la largeur de 8 m. pour la section mouillée. Le chemin de halage est disposé sur une passerelle supportée par des colonnes. Des lisses en bois guident le déplacement des bateaux et protègent la passerelle des chocs directs, la largeur disponible est de 6,00 m. Le coefficient n est voisin de 2,2. La passerelle est métallique.

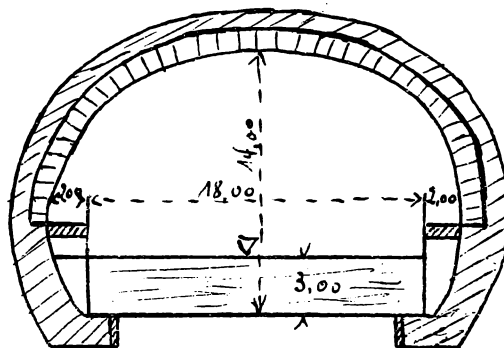
Du canal du Nord, (sout. de Ruyaulcourt) on a porté la largeur à 10 m. et prévu 2 passerelles de 2 m. de largeur ($n = 2,8$); elles sont en béton armé sur colonnes.

Le grand inconvénient de ces passerelles est le danger de leur dislocation par les chocs des bateaux. Des passerelles sur consoles, de préférence en béton armé, et placées au dessus du niveau des bateaux chargés pourraient être préférables.

Quoiqu'il en soit, ces sections à voie unique sont un obstacle important pour la navigation sur un canal à double voie, elles limitent pratiquement le trafic du canal et d'autant plus qu'elles sont plus longues. La seule considération qui peut les justifier est l'économie d'une dépense énorme, ce qui se présente dans le cas des souterrains de grandes longueurs. Et encore, l'accroissement progressif des dimensions des souterrains à voie unique, qui réduit fortement la différence avec la section à double voie, modifie-t-il sensiblement l'aspect de la question.

Pour la double voie, il faut un souterrain de 16 m., avec 2 passerelles. C'est la largeur du souterrain de Condes sur le canal de la Harne à la Saône.

Section du Souterrain



du Rove.

Voies navigables

Celle du souterrain du Rove, du canal pour bateaux de $60 \times 8 \times 1,8$ de N. Carseille au Rhône est de 22 m. Sa tendance moderne est de porter la profondeur de 2,50 à 3,00 pour réduire les effets des envasements, à cause de la difficulté des dragages dans les souterrains, et pour faciliter la navigation. De même, on doit mesurer largement le tirant d'air, à cause de la difficulté considérable d'augmenter ultérieurement la section du tunnel (agrandissement du tunnel de Neauvages, voir planches).

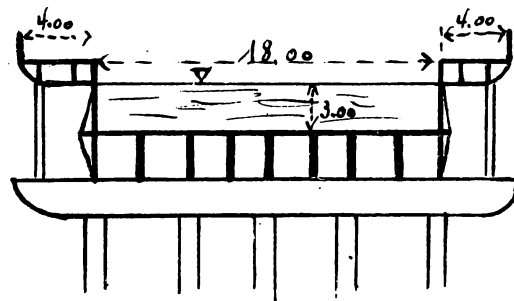
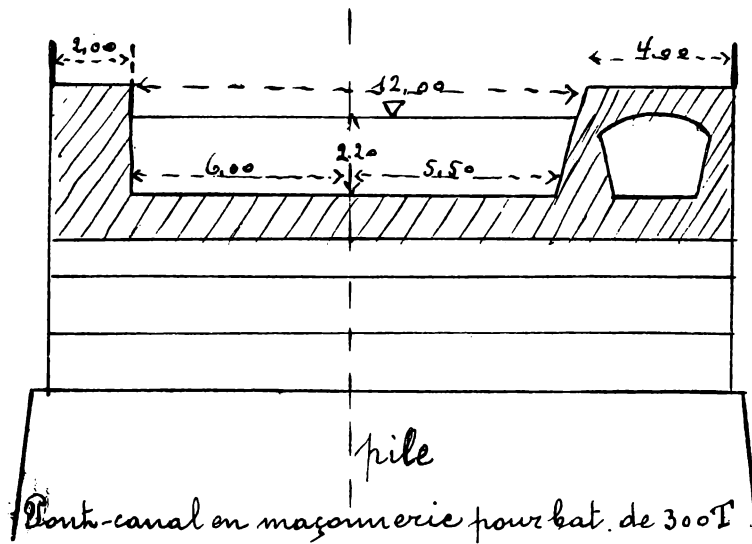
Pour pallier aux inconvénients des longs tunnels à une voie, on peut y établir des garages. Un garage central double théoriquement la capacité de trafic. En outre, on prévoit généralement une traction mécanique et une circulation organisée par trains en navette de tonnage, et plus récemment, le halage funiculaire par sections, paraissent très indiqués.

Mais il n'est plus compatible avec les conceptions modernes de constituer à simple voie les tranchées profondes contiguës aux tunnels, car le cube de déblai épargné par rapport à la double voie est faible en regard du cube total. Il convient au contraire de réduire à la longueur du souterrain la section rétrécie éventuelle et de permettre le garage des trains le plus près des têtes.

§ 8.) Ponts canaux.

Les ponts-canaux peuvent être à simple ou double voie. Les ponts-canaux métalliques sont généralement à simple voie, ceux en maçonnerie ou en béton armé sont à double voie. La longueur du pont n'influe guère sur la hauteur nécessaire pour un pont en maçonnerie ou en béton armé et, d'ailleurs, on n'emploie un pont en maçonnerie qu'en cas de hauteur disponible assez forte. Un pont métallique ne se justifie, aux portées habituellement modérées des ponts-canaux, qu'en cas de faible hauteur disponible. La simple voie est alors logique, par suite de la faible épaisseur du tablier. La flottaison étant plus basse, il y correspond aussi une économie de terrassements à la traversée de la vallée. Cependant, le pont métallique du canal de l'Emo à Hanovre et au Weser (bat. de 600 T) en dessus de la Seine, a 24,00 m. de largeur, 2,50 de profondeur et 2 passerelles latérales de halage de 2,75 m. Selon le principe qui est devenu d'application générale pour les chemins de fer, d'établir chaque voie sur un tablier indépendant, il semble de même préférable d'établir deux ponts-canaux métalliques

accolés à simple voie. Il en résulte une facilité et une sécurité considérables pour l'exploitation et l'entretien, points très importants pour ce genre d'ouvrages assez délicats et exceptionnels.



Section type de pont-canal en béton armé pour bat. de 600T.

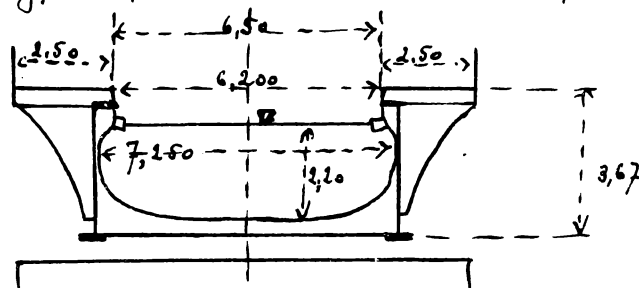


Schéma du pont-canal de Briare.

Le type des ponts-canaux métalliques français à 1 voie pour bateaux de 300t. est celui du canal de Briare.

Largeur d'eau	7,250	} n = 1,80 environ.
Écart d'eau	2,20	
Largeur disponible	6,20	
Largeur des 2 passerelles de halage	2,50	
Largeur totale	11,50.	

Les 2 passerelles de halage sont donc légèrement en saillie sur la cunette.

La section maillonnée des fronts en maçonnerie pour bat. de 300 t. est

largeur 11 à 12 m.

tirant d'eau 2,20

largeur des chemins de halage latéraux env. 4,00 m.

Sur le canal de l'Éms au Weser, il existe 2 fronts-canaux en béton armé de 24,00 m. de largeur et 3,00 m. de profondeur (pour bat. de 600 T), les chemins de halage ont 2,70 m.

Il n'y a pas de raison importante d'augmenter le tirant d'eau des fronts-canaux et l'effet d'une légère réduction de section ou même de la mise à simple voie est moins fâcheux que dans les tunnels, la longueur étant généralement moindre. Néanmoins, un pont-canal à section étroite peut limiter la capacité d'un canal, surtout s'il y a un courant d'alimentation. Il est donc toujours préférable d'établir la double voie ou, pour le moins, conserver une valeur assez élevée de n .

§9.) Tracé des canaux.

Le tracé doit satisfaire à des conditions économiques et techniques, ces dernières dérivent des circonstances topographiques, hydrographiques, hydrologiques et géologiques de la région. Les circonstances économiques déterminent le gabarit du canal projeté ainsi que les régions terminales et celles à desservir. En fait, il s'agit presque toujours de réunir 2 points d'une voie d'eau (canal latéral) ou 2 voies d'eau différentes (canal à point de partage). Il n'est généralement pas utile d'imposer strictement les points extrêmes du canal, surtout dans le cas d'un canal à point de partage.

Le tracé d'un canal latéral ne présente généralement pas de difficultés.

Il faut choisir des points de départ et d'aboutissement favorables, permettant une navigation aisée et non exposée aux envasements. Le trajet sera aussi court que possible, établi de préférence dans les bons terrains et en dehors du lit d'inondation. Il y a donc intérêt à remonter légèrement dans le versant de la vallée, afin d'établir le canal le plus possible en déblai dans de bons terrains. Le passage des affluents latéraux se fait également ainsi sur des longueurs plus réduites en siphon ou par pont-canal. On peut envisager des

souterrains pour reconfer des boucles prononcées ; la dépense très forte ne semble cependant justifier un tel projet que lorsque la chute créée peut produire de l'énergie hydroélectrique rémunératrice.

Observons que la rédaction d'un projet de canal latéral suppose qu'un examen complet ait été fait de l'aménagement du cours d'eau naturel par correction ou canalisation, en vue de le rendre navigable.

Pour les canaux des plaines basses, le tracé doit être aussi direct que possible entre les centres économiques à réunir et qui s'imposent généralement par leur importance ou leur situation. Les conditions géologiques variant généralement peu, les détails du tracé résultent surtout des circonstances topographiques locales : agglomérations, expropriations coûteuses, etc.

En terrain accidenté, les tracés des canaux à point de partage sont le plus souvent commandés par le choix du point de partage. Toutes choses égales, d'ailleurs, il y a avantage à le prendre aussi bas que possible :

- 1°) parce que, à flottaison égale, le bief de partage est plus court et moins profond ou bien, de préférence, la flottaison peut être abaissée ;
- 2°) parce qu'ainsi il y a moins d'écluses et que la navigation est plus facile ;
- 3°) parce que l'on évite les souterrains ou réduit leur longueur ;
- 4°) parce que l'on risque moins d'avoir la navigation arrêtée en hiver par les glaces ;
- 5°) parce que l'on est amené ainsi à développer le tracé dans les vallées latérales et à franchir les crêtes aux cols, c'est à dire d'avoir les conditions les plus favorables pour l'alimentation ;
- 6°) parce que l'alimentation par pompage, si elle est nécessaire, exige un travail moindre, par réduction de la hauteur de refoulement.

Ce sont donc les conditions d'altitude et d'alimentation qui déterminent surtout le choix du point de partage, accessoirement, les conditions géologiques et topographiques locales, qui sont d'ailleurs généralement favorables. Il peut cependant y avoir des exceptions, d'autant plus que le terrain est moins accidenté. En terrain plat, l'altitude ne joue plus aucun rôle.

Ce sont, par exemple, les conditions géologiques qui ont fait échouer jusqu'à présent toutes les tentatives de construction du bief de partage de l'Yverlée à

la Lys, tant en tunnel qu'en tranchée (tranchée profonde d'Heollebette, voir cours de terrassements).

Le choix du point de partage est d'autant plus strict qu'il est plus haut; il y a d'autant plus de latitude dans ce choix que le terrain est moins accidenté.

Les points terminaux découlent généralement du tracé de proche en proche à partir du point de partage, en satisfaisant le plus possible aux conditions économiques, qui consistent surtout dans la réduction de la longueur virtuelle entre les centres à desservir. Cette longueur virtuelle est une longueur fictive rapportée à la navigation en section normale de canal sans courant. Ainsi, on compte généralement la perte de temps aux écluses comme allongement de 1 à 3 km. de la longueur virtuelle. De même, la navigation à contre-courant, qui réduit la vitesse à moyens de traction équivalents, entraîne une augmentation de la longueur virtuelle dont on peut imaginer des expressions théoriques. Les prix de transport s'établissent, d'une manière plus ou moins implicite, d'après les longueurs virtuelles.

Naturellement, on établit le tracé dans les conditions les plus favorables pour l'alimentation par les cours d'eau de la région, pour sa construction dans des terrains meubles mais cependant imperméables, pour éviter les remblais longs et élevés, les ponts-canaux, les nombreux ouvrages d'art, les expropriations coûteuses, etc.

Tous avons vu que la longueur des biefs et les hauteurs de chute dépendent du tracé. A leur tour, ces éléments influent sur le tracé. L'emplacement des écluses notamment n'est pas arbitraire et doit répondre à diverses conditions, notamment : 1°) constituer un terrain favorable à l'implantation de l'ouvrage;

2°) être bien situé par rapport aux voies de communication terrestres, tant en vue de l'apport des matériaux de construction que de l'exploitation. Fréquemment, les écluses se construisent à proximité ou à l'intérieur des agglomérations en vue de la facilité de l'exploitation ou au croisement d'une voie importante, car elles permettent l'établissement économique de ponts sur la tête aval. Les emplacements des écluses constituent ainsi des points de passage obligés dans le tracé de détail.

Le tracé en plan d'un canal comporte des alignements droits reliés par des courbes. Nous avons indiqué déjà, à propos des sections mouillées, l'intérêt qu'il y a à avoir des courbes de grand rayon. En tout cas, les courbes de faible rayon gênent énormément la navigation et le minimum absolu pour les bateaux de 300T est de 300m. Pour les nouveaux canaux français, en vue de permettre la formation de trains, on s'impose généralement de ne pas avoir de rayons inférieurs à 500m. Pour les bateaux de 600 à 1000T, on évite de descendre en dessous de 1000m.

Pour des raisons de sécurité de manœuvre, entre 2 courbes opposées il faut toujours intercaler un alignement droit d'une longueur de bateau au moins et ne jamais disposer une section rétrécie à l'extrémité d'une courbe. Le raccordement de la section élargie en courbe avec la section normale en alignement droit se fait très progressivement (en général, sur une longueur égale à 20 fois l'élargissement).

Chapitre III.

Consommation d'eau et alimentation des canaux.

§1.) Pertes d'eau d'un canal.

Les canaux perdent constamment de l'eau. Les causes de ces pertes sont :

1°) l'évaporation. On doit compter : pour les régions maritimes de l'Europe centrale, 900 mm. par an ; pour les régions continentales (Allemagne), un peu plus, 1000 mm par exemple. La répartition annuelle est variable ; en moyenne 4 mm par jour pendant les 5 mois d'été et 1,7 mm pendant les mois d'hiver, avec un maximum de 1 cm. par jour en été. La hauteur de pluie tombée vient en déduction ;

2°) l'infiltration constitue une des pertes les plus importantes, surtout au début de l'exploitation d'un canal ainsi que lors du remplissage après une vidange de bief. Elle est aussi variable d'après l'époque de l'année, qui influence sur le niveau des nappes souterraines et sur le degré d'humidité et de porosité des terres. Elle est donc généralement plus grande en été qu'en hiver, saison dans laquelle il peut même éventuellement se faire des apports de filtration ou de ruissellement.

D'après les observations faites pendant de nombreuses années sur les canaux allemands, on peut compter, moyennant un étanchement soigné des biefs en remblai, une perte journalière moyenne de 2 cm. environ pour un plan d'eau de 34 m. de largeur.

Les auteurs français admettent des pertes plus élevées, atteignant jusqu'à 10 cm. par jour au premier remplissage et 5 cm. en régime normal. Cette différence résulte sans doute de la prédominance des terrains perméables dans les régions du Centre et du Nord de la France et du fait que ces canaux, généralement plus anciens, ont des étanchements moins parfaits que les canaux allemands.

L'exemple des canaux allemands montre que l'augmentation de mouillage ne donne pas lieu à un accroissement des pertes par infiltration, contrairement à une opinion assez répandue. Il faut surtout éviter des alternatives d'immersion et d'émergence des terres, notamment près de la flottaison; les étanchements doivent donc être poussés jusqu'au dessus de la flottaison normale, en vue des exhaussements. L'immersion prolongée produit le colmatage, que l'émergence peut détruire par dessiccation et fissuration.

Ces deux pertes réunies sont proportionnelles à la longueur du canal. Si elles comportent $(e + i)$ cm. par jour, cela correspond par jour et km. de canal, de largeur L m. au plan d'eau:

$$10 L (e + i) \text{ m}^3 / 24 \text{ heures} / \text{km}$$

ou

$$0,116 L (e + i) \text{ litre} / \text{''} / \text{km}.$$

Ce sont les pertes les plus importantes et elles sont capitales au point de vue de l'alimentation, parce qu'elles sont réparties sur toute la longueur du canal.

§ 2.) Consommation d'eau aux écluses.

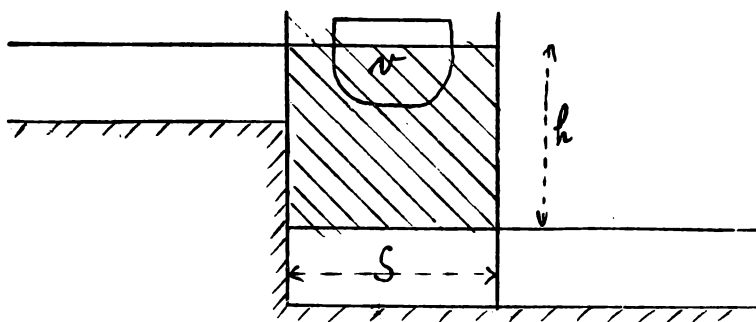
Ces pertes ont un autre caractère; elles ne dépendent pas de la longueur du canal, ni de sa chute totale, ni du nombre des écluses, mais de la chute de l'écluse la plus basse. En effet, l'eau perdue par l'écluse d'aval d'un bief entre à l'amont du bief inférieur et alimente donc celui-ci. A hauteur de chute constante et navigation uniforme, l'eau ne ferait donc que se transmettre identiquement de bief en bief depuis le plus haut jusqu'au plus bas et elle ne serait définitivement perdue qu'à la sortie de ce bief. Donc la

perte est bien déterminée par l'écluse inférieure; il est recommandable d'y rendre la chute minimum. Il est d'ailleurs logique de faire décroître la chute depuis le point de partage supérieur jusqu'au bief le plus bas, d'extrémité ou de partage inférieur, car les pentes du terrain décroissent dans le même sens et les biefs ont ainsi une longueur plus uniforme. Les plus fortes chutes doivent donc être voisines du point de partage ou, d'une manière plus générale, en tenant compte de l'alimentation en des points où les besoins d'alimentation sont les plus élevés. En effet, la consommation en cette écluse est élevée et envoie dans le bief inférieur un excès d'eau par rapport à la consommation de l'écluse d'aval. Mais cet excès sert précisément à compenser les pertes du bief inférieur.

Les pertes sont dues, dans une faible mesure, au défaut d'étanchéité des portes; on compte, pour des portes normalement étanches, 5 litres/" par mètre de hauteur de chute. L'influence sur la tenue du bief supérieur dépend de sa longueur et de la largeur du plan d'eau; l'étanchéité est surtout importante pour les biefs courts.

La principale perte provient de l'éclusage des bateaux. Le passage des bateaux se fait en mettant le sas alternativement en relation avec les 2 biefs qu'il sépare.

On voit donc qu'à chaque opération, que le bateau soit montant ou descendant, un volume $S \times h$ d'eau passe du bief supérieur au bief inférieur; S étant la surface du sas, h la hauteur de chute. Mais ce n'est pas tout.



Soit v_d le volume déplacé par un bateau descendant, v_m le volume déplacé par un bateau montant. On voit qu'un bateau descendant refoule dans le bief supérieur, en entrant dans le sas, un volume v_d et réduit d'autant la consommation par sassée. Au contraire, un bateau montant refoule v_m

dans le bief inférieur et, à sa sortie de l'écluse dans le bief supérieur, appelle v_m dans le sens au détriment du bief supérieur.

Donc, l'éclusage d'un bateau descendant seul consomme $Sh - v_d$; l'éclusage d'un bateau montant seul consomme $Sh + v_m$; l'éclusage simultané d'un bateau montant et d'un descendant

$$Sh + (v_m - v_d)$$

Le second terme est négligeable si les 2 bateaux sont vides ou chargés; il est positif si le bateau montant est chargé et le bateau descendant vide et négatif si le cas est inverse; c'est le plus favorable pour le bief supérieur. Si n est le nombre d'éclusages par jour, pour n_d bateaux descendants et n_m bateaux montants ($n_d + n_m \leq 2n$)

la consommation totale est $nSh \left(\sum v_m - \sum v_d \right)$

Elle est minimum si tous les éclusages sont doubles et si

$$\sum v_m = \sum v_d$$

ce qui, sauf égalité fortuite, exige que $n_m = n_d = n$ et que les bateaux se correspondent vide pour vide et chargé pour chargé. Cette condition est réalisée sinon jour pour jour, du moins dans un délai assez long, dans les canaux ou biefs de transit, et la consommation moyenne par passée est Sh .

La consommation devient maximum en une écluse lorsque le bief supérieur comporte un port de déchargement important ou que le bief inférieur comporte un port de chargement important, car alors l'excès de $\sum v_m$ sur $\sum v_d$ est maximum, presque tous les bateaux montants étant chargés et les bateaux descendants vides.

§3.) Fluctuation des plans d'eau des biefs.

Les pertes par évaporation et infiltration font baisser régulièrement le niveau de 2 à 5, exceptionnellement de 10 cm. par jour. L'alimentation a pour but de restituer régulièrement ou par à-coups les pertes subies. Cela se fait par un courant d'alimentation, dont une partie peut d'ailleurs, comme nous l'avons déjà indiqué plus haut d'une manière générale, être transmise par les éclusages.

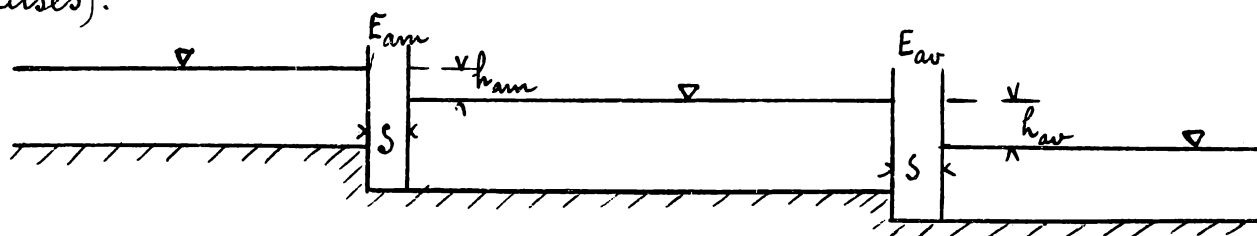
Les éclusages produisent une variation instantanée des niveaux des biefs, notamment un abaissement du plan d'eau supérieur et une élévation du

du plan d'eau inférieur. Pour une écluse, la variation de niveau est d'autant plus grande que le bief est plus étroit et plus court.

Soit h_{am} la chute de l'écluse amont d'un bief, h_{av} la chute de l'écluse aval, en supposant les superficies identiques. Soit n_{am} le nombre d'éclusages en amont, n_{av} le nombre d'éclusages en aval par jour. Le cube total introduit par jour dans le bief est

$$V = S (n_{am} \times h_{am} - n_{av} \times h_{av})$$

(en admettant que les effets des bateaux vides et pleins se compensent aux 2 écluses).



Si le bief a principalement un trafic de transit, $n_{am} = n_{av}$ et

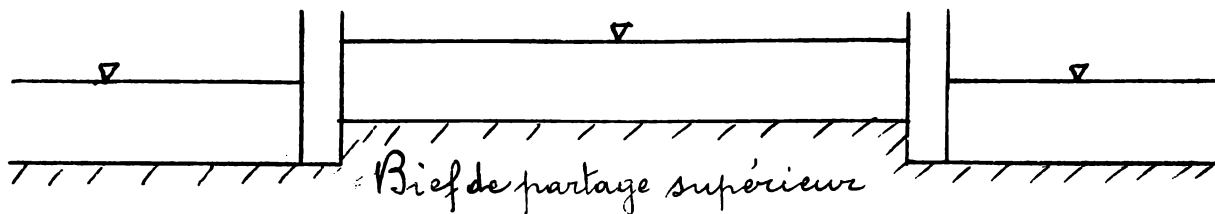
$$V = n S (h_{am} - h_{av})$$

Dans ce dernier cas, il y a compensation si $h_{am} = h_{av}$ et il y a appauvrissement du bief si $h_{av} > h_{am}$. Dans les deux hypothèses, il faut une alimentation pour restituer les pertes et éviter une réduction trop considérable du mouillage. Si, au contraire, $h_{am} > h_{av}$, il y a apport. Cet apport peut compenser en partie ou totalement les pertes constantes ou même les dépasser, dans ce cas il reste un excès à évacuer pour l'alimentation des biefs contigus.

S'il y a changement de sens de marche des bateaux dans le bief (ports, usines, etc), il y a appauvrissement lorsque la navigation se fait principalement en aval, apport lorsqu'elle se fait principalement en amont et il peut y avoir compensation lorsqu'elle se fait dans les deux directions. Ses mêmes conséquences en résultent au point de vue des pertes et de l'alimentation.

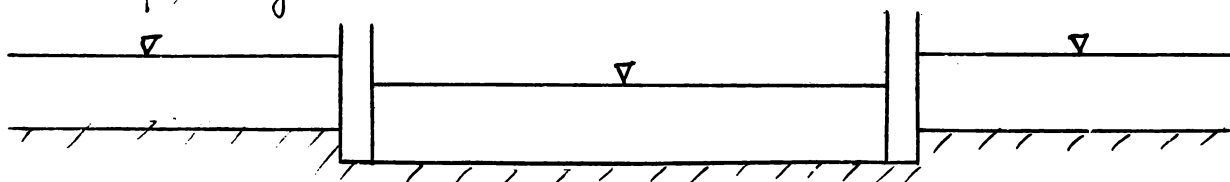
Les biefs de partage sont dans une situation particulière. Dans un bief de partage supérieur, les 2 écluses jouent le rôle d'écluse d'aval, V est toujours négatif. Un bief de partage supérieur doit donc être nécessairement alimenté.

L'eau d'alimentation en excès sur les pertes constantes est envoyée dans les biefs des deux versants contigus et contribue à leur alimentation.



Bief de partage supérieur

Un bief de partage inférieur reçoit au contraire toujours des apports, les deux écluses sont des écluses d'amont et V est toujours positif. Si la navigation est intensive, l'apport peut être toujours supérieure aux pertes constantes et l'excès doit être évacué ou bien remonté mécaniquement pour l'alimentation des biefs contigus.



Bief de partage inférieur.

On voit donc que le problème est assez complexe et dépend de l'importance et de la répartition de la navigation, qui ne peuvent presque jamais être connus complètement lors de l'établissement d'un nouveau canal. La question de l'alimentation doit donc être étudiée dans les hypothèses les plus défavorables, de manière à créer des réserves et très souvent, la progression du trafic et l'établissement des ports oblige après coup à des remaniements. L'économie de l'alimentation oblige à utiliser autant que possible la consommation des écluses pour les biefs inférieurs; l'alimentation doit donc se faire de préférence par les biefs de partage supérieurs et les biefs intermédiaires par rapport auxquels la navigation se fait principalement en aval.

Le problème est relativement simple si la navigation est très régulière et si les caractéristiques du canal: longueurs des biefs et hauteurs de chutes, sont très régulières. Le débit des éclusages se transmet alors presque intégralement d'amont en aval et l'alimentation doit comporter, outre ce débit presque constant fourni en amont, les pertes proportionnelles à la longueur du canal.

Mais si la navigation est irrégulière et si les longueurs des biefs et les hauteurs de chute sont variables, les fluctuations instantanées des plans d'eau peuvent être importantes et donner lieu à des pertes sensibles par

réglage des biefs. Les biefs où la navigation se fait principalement dans un sens et surtout les biefs courts sont particulièrement défavorables à ce point de vue. Lorsque la navigation se fait par trains et qu'il n'y a pas coïncidence d'éclusage aux deux extrémités d'un bief court, la fluctuation de niveau peut être dangereuse pour la navigation si l'on n'y pare pas par des dispositifs spéciaux, qui acquièrent une importance particulière dans les échelles d'écluses, où les longueurs des biefs sont des multiples faibles des longueurs des sas. Il est donc désirable, dans ces échelles d'écluses, d'assurer une certaine simultanéité d'éclusage, ce qui est possible grâce à la proximité des écluses.

On peut même concevoir idéalement une interdépendance mécaniquement assurée des éclusages, mais que les caractères d'irrégularité de la navigation ne permettent pas de réaliser facilement.

Nous avons vu que l'excès du mouillage sur le tirant d'eau est généralement de 40 à 50 cm; il en résulte qu'un abaissement du plan d'eau de cette quantité entraîne l'échouage, qui peut être fatal aux bateaux. Comme il faut compter avec les envasements, les modifications de profil et les corps immergés, on peut considérer qu'une baisse d'eau de 20 cm. est l'extrême limite pour la sécurité de la navigation et qu'il est préférable de la limiter à 10 cm. Pour l'élévation du plan d'eau, il semble y avoir plus de marge, puisque la revanche des rives est au maximum de 70 cm.

Mais cependant pratiquement, la limite d'exhaussement ne doit pas être très supérieure à la limite d'abaissement, parce que les fluctuations du plan d'eau dégradent les berges et augmentent les infiltrations; elles peuvent aussi influencer sur les nappes souterraines des terrains bas riverains et porter ainsi préjudice aux riverains (cultures). Enfin, il y a le danger non négligeable de rupture de digues par débordement, si le bief est en remblai.

Si nous considérons une écluse de $40 \times 5,2 \times 5 = 1040 \text{ m}^3$ et un bief court de 250 m. et 16 m. de largeur, la fluctuation du niveau correspondant à une éclusée est $\frac{1040}{4000} = 26 \text{ cm}$. Pour un bief de 2,5 km, elle est de 2,6 cm. Quatre éclusées successives en aval sans éclusée d'amont abaissent donc le plan d'eau de plus de 10 cm. On voit donc que la question est à prendre en sérieuse considération pour les biefs moyens ayant une navigation

d'aval et qu'il est presque impossible de respecter les limites dans les biefs courts.

Pour cette raison, il est utile de donner aux biefs courts un excès de mouillage, de 50 cm. par exemple, combiné avec un changement du plan d'eau. Pour les mêmes raisons, on donne parfois un excès de mouillage du même ordre à certains biefs dits biefs de réserve, de préférence des biefs de partage supérieur et des biefs dans lesquels la navigation se fait principalement en aval.

§ 4.) Régulation des biefs et pertes correspondantes.

La combinaison des pertes, de l'alimentation et des éclusages produit donc des fluctuations des plans d'eau qu'il est nécessaire de limiter par la régulation des biefs. Cette régulation a d'ailleurs aussi pour objet, en combinant avec les éclusages, de transmettre le débit d'alimentation. Elle se fait par les vannes servant aux éclusages ou, de préférence, par des vannes spéciales.

La régulation constante des biefs peut être en effet difficile par suite des irrégularités de la navigation et il faut aussi excuser la négligence possible des éclusiers. Si pour ces raisons, le niveau d'aval a trop baissé ou le niveau d'amont s'est trop élevé, l'éclusier peut envoyer d'amont en aval des quantités d'eau qui dépassent les besoins de l'alimentation normale, surtout si par négligence, la régulation est excessive. En d'autres termes, l'action intermittente, brusque et mal réglée de la régulation, qui se répercute en amont et en aval en cas de faute, produit des consommations excessives d'eau, non utiles pour la stricte alimentation.

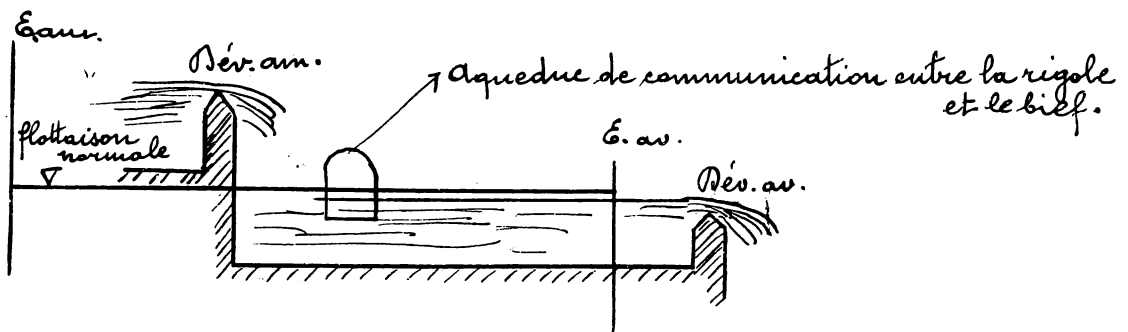
Ce danger existe surtout avec les vannes profondes, telles que les vannes d'écluse, parce que la charge motrice sur l'orifice varie peu avec les fluctuations des niveaux. Au contraire, des orifices larges ou des déversoirs situés à peu de profondeur sous le niveau du plan d'eau normal produisent en quelque sorte une auto-régulation et empêchent en tous cas une vidange excessive du bief supérieur.

On est conduit ainsi aux principes de l'auto-régulation et de l'auto-alimentation, qui assurent une régularité aussi parfaite que possible des plans d'eau et sans doute le minimum des pertes de régulation compatible avec les circonstances. Ces dispositifs sont particulièrement recommandables pour les canaux dont l'alimentation est difficile. On peut concevoir

et il existe différents types d'appareils, pour les détails desquels je renvoie à la littérature spéciale.

Le dispositif auto-régulateur le plus simple est un petit déversoir de superficie envoyant l'eau du bief supérieur au bief inférieur par une rigole ou aqueduc. La charge motrice est toujours faible; pour évacuer le débit instantané qui peut être assez grand en cas de bief court, sans que la lame déversante ne devienne trop épaisse, il faut lui donner une longueur suffisante, généralement de quelques mètres.

Pour ne pas prendre trop de place, le déversoir peut être placé latéralement.



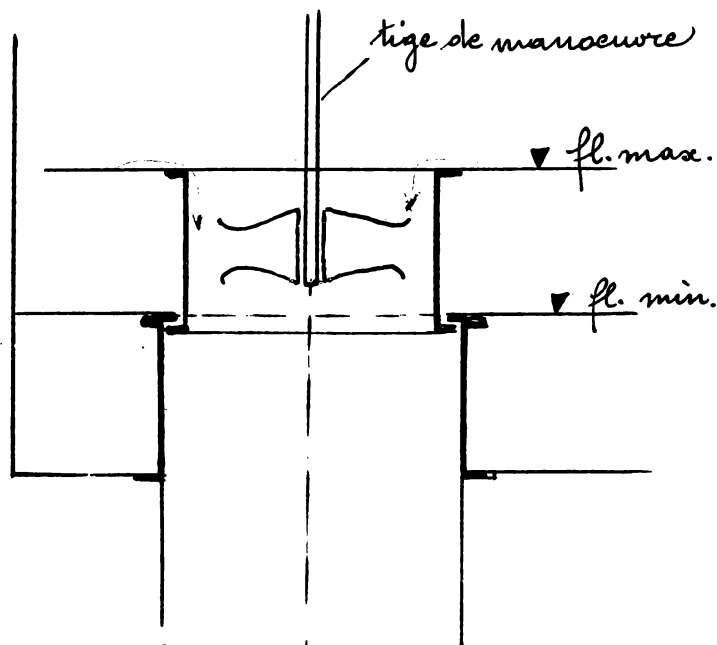
Des déversoirs fixes de ce type constituent le principe des rigoles régulatrices dont sont munies les échelles d'écluses de certains canaux français. Ces rigoles, réunissant tout l'ensemble des biefs courts, produisent un réglage aussi bien positif que négatif. Si le niveau d'un bief est trop élevé, le déversoir d'aval débite en effet l'excès. Si, par suite d'un éclusage à l'aval, le niveau est abaissé, le déversoir d'aval ne peut plus fonctionner, mais le déversoir d'amont débite seul jusqu'à ce que le niveau soit rétabli. La régulation est d'autant plus parfaite que la vidange des écluses est plus régulière.

Ce système, pour être satisfaisant, suppose toutefois une certaine compensation dans les éclusages. Des éclusages simultanés ou presque des diverses écluses réalisent les meilleures conditions et rendent les pertes par les rigoles régulatrices négligeables. Au contraire, plusieurs éclusages successifs en amont sans éclusage en aval font perdre la presque totalité de l'eau des sasses; c'est l'inconvénient général des régulateurs à déversoir fixe.

La rigole régulatrice sert en même temps de rigole d'alimentation et les déversoirs débitent normalement le courant d'alimentation, qui n'emprunte donc pas le canal. La longueur des déversoirs est telle que le débit d'une sasse

puisse être évacuée par exemple, sous une épaisseur supplémentaire maximum de 10 cm. de la lame déversante.

Au lieu de rigoles régulatrices à déversoirs fixes, on peut aussi disposer aux écluses des régulateurs automatiques réglables, tels que le déversoir cylindrique mobile du canal de la Meuse à la Saône. Il consiste, en principe, en une vanne cylindrique comprenant une partie inférieure fixe ou siège, scellée au dessus du fruit de décharge et dans laquelle coulisse à joint étanche le cylindre mobile, dont la hauteur est réglable par un cric. L'appareil est métallique ; le déversement se fait par l'intérieur du cylindre au dessus de l'arête supérieure qui constitue un déversoir circulaire à grand développement sur un faible espace. Le réglage de la hau-



teur permet de restreindre le débit et d'élever le plan d'eau du bief en cas de plusieurs éclusages successifs en amont ou, au contraire, en cas de remplissage exceptionnel du bief aval après mise à sec ou abaissement important du plan d'eau, d'envoyer un plus fort débit.

Cet appareil, qui a l'avantage d'être réglable, n'est automatique que pour empêcher les relèvements. Le réglage du niveau inférieur en cas d'abaissement exige une intervention de l'éclusier d'amont et risque, par fausse manoeuvre, d'appauvrir le bief supérieur. Pour supprimer toute irrégularité, on peut enfin disposer aux écluses, en liaison avec les déversoirs régulateurs, des alimentateurs automatiques commandés par le niveau du bief inférieur et

agissant en cas d'abaissement du plan d'eau. Ces appareils, imaginés par M. Galliot, fonctionnent d'après le principe des vannes automatiques à flotteurs; la vanne est une vanne cylindrique équilibrée. Ce sont donc des appareils en somme délicats. Or, pour des appareils de ce genre, la robustesse, sinon la rusticité, est une qualité essentielle.

Un nouveau type plus rustique a été imaginé par M. Suquet, qui réunit d'ailleurs le déversoir régulateur coulissant et l'alimentateur automatique en un seul appareil. Étant commandé par le niveau d'aval, il évite les pertes d'eau tout en empêchant une élévation excessive du plan d'eau amont.

La liaison entre les biefs est réalisée par un aqueduc, éventuellement par celui de l'écluse ou, de préférence, par un aqueduc spécial, s'il y a un régulateur automatique.

Pour plus de détails, voir l'ouvrage sur les canaux de M. M. Jacquinet et Galliot et la littérature spéciale. Les dimensions et formes appropriées des dispositifs régulateurs peuvent se déterminer avantageusement par des essais sur modèles réduits.

§ 5. Pertes accessoires.

Outre ces pertes principales et courantes, il y a des pertes accidentelles telles que celles qui se produisent lorsque l'on ouvre les ventelles d'amont d'une écluse pour favoriser la sortie des bateaux (pratique peu recommandable) ou, lorsqu'en hiver, on veut produire un léger courant pour éviter la formation de la glace. Une vitesse d'environ $0,07 \text{ m/s}$ suffit jusqu'à environ -10° , ce qui correspond d'ailleurs à un débit important au point de vue de l'alimentation d'un canal, de 50 w litres/s , étant en m^2 la section du canal (d'après Jacquinet et Galliot).

Des pertes importantes se produisent lors du remplissage des biefs après vidange accidentelle ou voulue. Les infiltrations sont très grandes au début et on doit généralement compter pour la mise en eau sur un volume double de celui de la cuvette, mais la proportion est variable d'après la saison, la durée du chômage, la nature des terrains, etc.

Lorsqu'elle est énorme, le terrain étant redevenu très perméable; la mise en eau peut être très difficile. Il faut donc éviter les chômages des canaux

autant que possible et notamment fractionner les très longs biefs par des portes de sécurité; soit des bateaux portes ou des portes spéciales busquées à vanes levantes ou à segments ou rabattantes (à axe horizontal). Ces portes sont susceptibles aussi de réduire les conséquences de ruptures de digues.

Elles n'ont été guère employées jusqu'à présent qu'en Allemagne, ce qui se justifie par la longueur des biefs et l'importance des sections mouillées.

Elles servent principalement à isoler des sections voisines les parties de canaux en haut remblai ou bien à sectionner les longs biefs droits de plus de 50 km. de longueur. Les plus connues sont les portes à segments du bief de 86,6 km. du canal de Dortmund à l'Éms. Ce type permet une fermeture rapide et aisée en toutes circonstances et quel que soit le sens de la pression.

Le sectionnement des biefs exige des dispositions permettant la continuité de l'alimentation. Enfin, des pertes spéciales sont celles qui résultent des prises d'eau aux usines, généralement restituées en partie, celles des prises d'eau pour les irrigations, que l'on établit souvent sur les canaux dans les régions agricoles, etc. On arrive ainsi à des canaux à courant, qui doivent faire l'objet d'une étude hydraulique spéciale.

Une certaine partie des pertes par infiltration se récupère, notamment par les infiltrations le long des écluses à la jonction des biefs. Les eaux d'infiltration des digues, recueillies par les fossés latéraux peuvent être aussi conduites dans le bief d'aval.

Il est recommandable de déterminer périodiquement les pertes, par exemple annuellement et en diverses saisons, en interrompant l'alimentation et, éventuellement, la navigation, pendant quelques jours. On établit un graphique de variation des pertes d'après le niveau. On peut ainsi se rendre compte de l'étonchété du canal et contrôler les besoins alimentaires.

§6. Réduction de la consommation des écluses. -

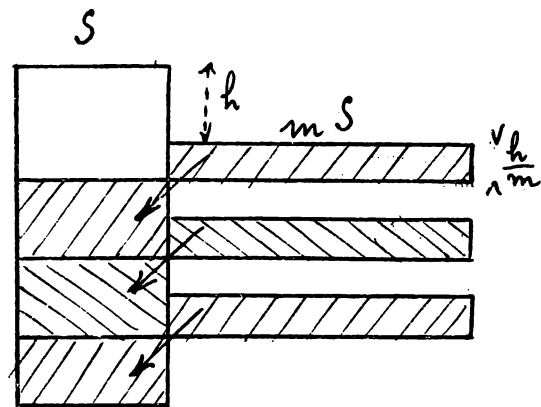
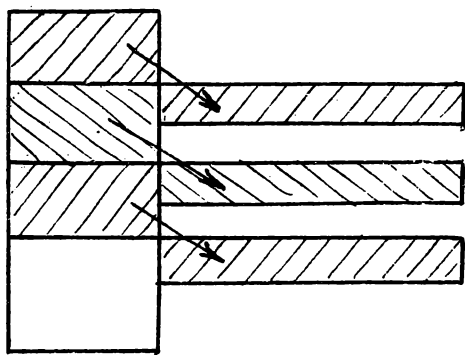
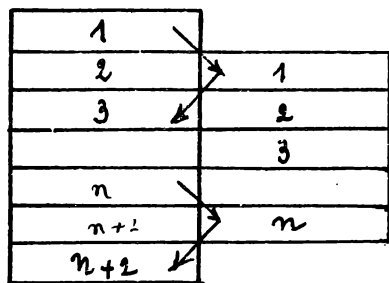
Bassins d'épargne.

Si B est la section horizontale moyenne du bateau et t le tirant d'eau moyen utile, la consommation d'eau d'une écluse par tonne utile

transportée est $\frac{Sh}{BE}$. Pour les bateaux de 300t., en tenant compte de l'enfoncement à vide de 0,30 et des bateaux pleins et vides, on a $t = 1,00$ environ.

Le rapport de la section de l'écluse à celle du bateau ne peut pas descendre en dessous de 1,30 environ pour permettre la manœuvre. Par tonne, la consommation d'eau est donc 1,30 h m³. Pour 1.000.000 tonnes et $h = 6$ m., il faut donc près de 8.000.000 m³ d'eau. Lorsque l'alimentation est précaire et que les chutes sont assez fortes, il y a donc intérêt à réduire la consommation d'eau des écluses, ce qui se fait au moyen des bassins d'épargne, basés sur le principe suivant.

Supposons la chute de l'écluse divisée en $n+2$ parties égales, constituant $n+2$ tranches horizontales identiques de l'éclusée. Disposons latéralement à l'écluse une seconde capacité de même section, divisée en n compartiments correspondant aux tranches de l'éclusée, sauf les 2 extrêmes. Ce sont les bassins d'épargne. Lors de la vidange du sas, la



tranche supérieure 1 descend dans le bassin d'épargne supérieur 1, 2 dans 2, etc. et la tranche n dans le dernier bassin n . Les 2 tranches inférieures s'écoulent dans le bief inférieur. Au remplissage, le bassin d'épargne inférieur n fournit la tranche inférieure $n+2$ du sas, etc. et le bassin d'épargne supérieur 1 fournit la tranche 3. Les 2 tranches supérieures sont prélevées sur le

bief supérieur. Donc, théoriquement, la consommation est réduite à 2 tranches, soit à $\frac{2}{n+2} \times$ volume de l'écluse (sans tenir compte du déplacement du bateau). L'économie relative est donc $\frac{n}{n+2}$. Généralement, le nombre de bassins d'épargne $n = 2$ à 4, l'économie théorique oscille entre $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{3}$. Elle croît moins vite que le nombre de bassins d'épargne. Comme ceux-ci exigent beaucoup de place et une forte dépense, il n'y a pas intérêt de donner une grande valeur à n .

L'économie peut être théoriquement accrue en donnant aux bassins d'épargne une section $m S$ multiple de celle de l'écluse. D'après la disposition théorique schématisée ci-dessus, la consommation est réduite, s'il y a n bassins d'épargne, à $\frac{1 + \frac{1}{m}}{n+1 + \frac{1}{m}}$ de l'écluse totale et l'économie relative est $\frac{n}{n+1 + \frac{1}{m}} = \frac{nm}{(n+1)m+1}$.

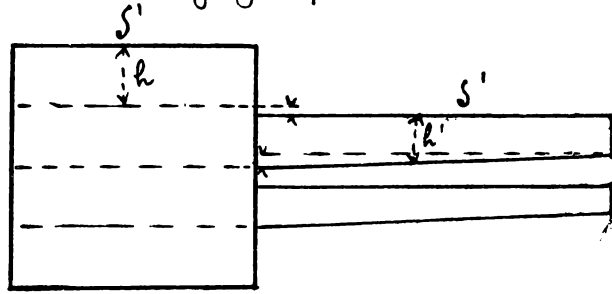
Le diagramme de la planche représente les courbes d'économie relative en fonction de n et de m . On voit qu'il n'y a pas grand intérêt à dépasser notablement $m = 1$ et que n est avantageusement compris entre 2 et 4. L'économie théorique moyenne est d'environ 60%. Mais il est désavantageux que m soit < 1 .

En fait, l'économie réelle est inférieure à l'économie théorique indiquée.

En effet, dans le dispositif théorique représenté, la fin de l'écoulement de chaque tranche se fait sous charge nulle. L'écoulement ne peut donc être complet sans exiger un temps très considérable. Comme l'opération se répète pour chaque bassin, l'économie de consommation ne peut être réalisée qu'au prix d'une durée d'éclusage plus grande, d'autant plus que l'économie est plus grande, c'est à dire qu'il y a plus de bassins. C'est une autre raison d'en établir un nombre modéré.

Pour réduire le plus possible la durée des opérations en se rapprochant suffisamment de l'économie théorique, c'est à dire en utilisant assez complètement la capacité des bassins, on leur donne une section horizontale S' supérieure à la section S de l'écluse et une hauteur h' inférieure à celle des tranches (h), de telle sorte que $S'h' = Sh$. Le bassin d'épargne n'occupe ainsi qu'une fraction de la hauteur de la tranche contiguë. De la sorte, l'échange d'eau entre le sas et le bassin d'épargne et vice-versa se fait

toujours sous une certaine charge jusqu'au bout de l'opération. Le fond du



bassin d'épargne reçoit une certaine pente vers le sas pour favoriser la vidange complète (Voir cours d'écluses, planche).

En conclusion, il faut chercher à obtenir par les bassins d'épargne une économie sensible sans trop allonger la durée de manœuvre. Celle-ci comporte la durée de manœuvre de toutes les vannes (ouverture et fermeture) et la vidange des divers bassins ou leur remplissage. Ces dernières opérations étant les plus longues, c'est elles qu'il convient d'accélérer par l'emploi d'orifices à très grandes sections. Pour éviter la turbulence, il faut prévoir une ouverture très progressive des vannes. La fermeture doit être très rapide. Les vannes à faible levée réalisent le mieux ces conditions. La durée de leur manœuvre est comprise dans celle de l'écoulement en majeure partie.

On emploie des orifices circulaires de grand diamètre ou rectangulaires de grande largeur. La commande doit être autant que possible centrale, ce qui implique la manœuvre électrique.

Pour l'étude de la durée d'écoulement, je renvoie au cours d'écluses.

La question étant complexe, il est recommandable d'établir les bassins d'épargne et leurs organes de vidange d'après des essais sur modèles en vue de concilier l'économie d'eau, la rapidité de manœuvre et la réduction des frais d'établissement.

§7. Généralités sur l'alimentation.

On peut, d'après les considérations précédentes, déterminer les besoins alimentaires totaux et par sections d'un canal. Ils sont d'ailleurs variables et, lorsque l'alimentation est artificielle ou précaire, il n'importe pas seulement de connaître les maxima, mais autant que possible les variations des besoins alimentaires dans le temps.

Pour le moins, il faut déterminer les besoins alimentaires annuels et

leur répartition entre certaines périodes caractérisées : saison chaude et froide par exemple, ainsi que les maxima instantanés.

Il faut ensuite comparer ces besoins aux ressources et utiliser dans la mesure du possible les ressources naturelles, c'est-à-dire les débits que les cours d'eau naturels peuvent envoyer dans le canal par la gravité.

Il faut cependant éviter d'envoyer dans le canal les eaux qui sont superflues pour l'alimentation et qui doivent être évacuées ensuite en aval, elles augmentent le courant d'alimentation et sont défavorables à la conservation de la voie d'eau. Il faut au contraire chercher à compenser strictement les pertes, considération qui est impérieuse si l'alimentation est précaire ou artificielle.

Pour les mêmes raisons, il y a intérêt à alimenter par sections indépendantes aussi courtes que possible. On réduit le courant d'alimentation et on réduit les pertes par fausses manoeuvres ou négligence aux écluses. On permet la vidange d'une section, ou d'un bief sans compromettre l'alimentation des autres, de même que le remplissage ultérieur.

En alimentant par sections et en prélevant sur les cours d'eau les quantités d'eau strictement nécessaires, on réduit le moins possible les débits locaux des cours d'eau, ce qui est important pour les riverains qui ont d'ailleurs souvent des droits établis sur ces cours d'eau.

Lorsque ces conditions idéales ne peuvent être réalisées, il faut créer des réserves. C'est le cas notamment lorsque l'alimentation est dite saisonnière, c'est-à-dire qu'elle est naturelle en hiver, artificielle en été. Aux périodes de transition, l'alimentation peut être difficile ou troublée. En dehors des réserves que l'on peut créer sur les cours d'eau alimentaires par des barrages de réservoirs et dont nous parlerons plus loin, il est utile d'approfondir certains biefs et de permettre l'exhaussement de leur plan d'eau, en vue de créer une réserve de quelques jours pour leur propre alimentation ou celle des biefs voisins. Cette disposition est également utile lorsque la vidange d'un bief interrompt l'alimentation des autres. L'eau du bief vidé doit être employée, autant que possible, à maintenir les plans d'eau des biefs dont l'alimentation est interrompue.

Il est favorable aussi de pouvoir mettre des biefs en communication avec des étangs voisins, de manière à accroître la surface du plan d'eau, ce qui augmente l'effet d'une élévation de ce plan. L'avantage est encore accru s'il est possible, par le moyen d'un ouvrage de retenue simple, de tenir le niveau de l'étang au dessus de celui du canal.

L'amenée des eaux d'alimentation se fait par des rigoles autant que possible, parfois par des aqueducs, conduites forcées ou tunnels. Il faut éviter les longues rigoles à cause des frais de construction et d'entretien élevés et des pertes d'eau, qui sont analogues à celles du canal même. Ceci est un élément qui est en faveur de l'alimentation de bief en bief, qui a acquis une importance toute particulière.

(58). Alimentation naturelle et artificielle

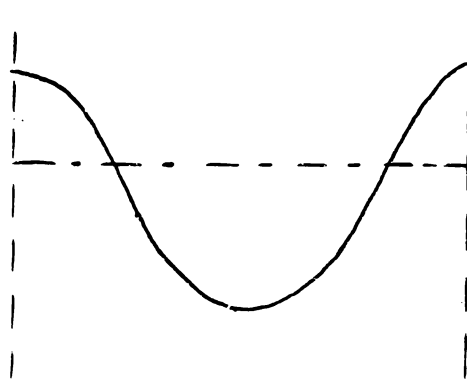
par la gravité.

L'alimentation naturelle consiste à prélever le débit d'alimentation sur un cours d'eau naturel en un point tel que ce débit puisse être amené au canal par une rigole alimentaire. Outre la différence de niveau suffisante, il faut que le débit disponible présente un excès suffisant sur le débit minimum à laisser au cours d'eau. Si cet excès est suffisant en toute saison pour assurer l'alimentation, celle-ci peut être naturelle pendant toute l'année. Très souvent, l'alimentation naturelle fait défaut en été. Pour ne pas devoir créer une alimentation artificielle complètement indépendante, on cherche à ajouter en été au débit naturel un débit artificiel égal à la totalité des prises réelles effectuées sur le cours d'eau d'alimentation, déduction faite des rentrées.

On doit admettre, en effet, qu'en basses eaux, qui dépendent surtout comme on le sait du débit des nappes souterraines, une grande partie des eaux d'infiltration du canal reviennent au cours d'eau. Cela dépend de la nature du terrain, de l'importance des pertes, de la distance du canal et du cours d'eau, etc. Toutefois, la quantité est évidemment mal définie et la question peut donner lieu à des contestations s'il y a des usagers en aval sur le cours d'eau, surtout en basses eaux. Il y a donc intérêt à conserver le mieux possible les eaux amenées dans le canal,

c'est à dire d'assurer une étanchéité satisfaisante.

Le débit artificiel peut être obtenu par un réseau de rigoles de drainage (ce qui revient à chercher des ressources alimentaires dans les nappes souterraines, peu profondes) ou par le raccordement avec des étangs voisins, dans lesquels on emmagasine éventuellement par de petits ouvrages de retenue; en dérivant une partie du débit d'un cours d'eau voisin, enfin en emmagasinant l'excès d'eau de la saison froide pour suppléer à l'insuffisance de débit de la saison chaude par emmagasinement au moyen de barrages de réservoir. Ces ouvrages assurent donc une véritable régularisation du débit. Idéalement, l'ouvrage permet de substituer à la courbe irrégulière des débits d'amont la droite du débit moyen. Pratiquement, ce débit moyen peut être insuffisant un certain temps, il faut alors débiter moins en période d'emmagasinement, ou bien, le débit annuel est trop grand, ou la capacité insuffisante et une certaine partie des débits élevés de la saison froide n'est pas retenue dans le réservoir.



Abstraction faite de la hauteur de retenue, qui n'a pas la même importance que pour une usine hydro-électrique, les principes d'établissement des réservoirs et des barrages pour l'alimentation des canaux sont les mêmes que pour l'alimentation en eau potable, la houille blanche, etc; je renvoie donc à l'étude des usines hydro-électriques et à celle des barrages de réservoir.

Observons que c'est dans les parties hautes des cours d'eau alimentaires que le débit est généralement insuffisant pour l'alimentation du canal, car le débit est faible et les besoins alimentaires élevés. En descendant, le débit croît et les besoins alimentaires diminuent. A partir d'un certain point en aval, l'alimentation naturelle devient constante. C'est donc dans la région du

bief de partage et des biefs supérieurs que l'on doit établir les réservoirs. Il en résulte que leurs bassins sont peu étendus et que les quantités d'eau annuelles recueillies sont faibles. Aussi est-il fréquemment nécessaire d'établir de nombreux réservoirs et parfois de dériver dans un réservoir l'eau de plusieurs cours d'eau voisins.

Les réservoirs, surtout avec digues en maçonnerie, sont des ouvrages coûteux et donnent un prix élevé de l'eau d'alimentation. Il faut considérer que les réservoirs donnent lieu à des pertes importantes par évaporation et infiltration. Il en est de même dans les rigoles. Il est donc recommandable de conduire l'eau par le plus court chemin dans le bief de partage et d'alimenter par descente de bief en bief avec régulation automatique pour éviter les pertes.

Dans certains cas, on a très judicieusement récupéré l'énergie du courant d'alimentation à la chute des écluses du bief de partage pour produire l'énergie électrique nécessaire pour la traction des bateaux. De cette manière, on peut récupérer une partie de la dépense d'alimentation. On récupère aussi le plus possible l'énergie de la chute du barrage.

L'alimentation naturelle et par la gravité s'applique généralement à tous les canaux latéraux et dans certains cas aux canaux à bief de partage. Les canaux latéraux ont généralement une prise d'eau principale à leur origine amont, prélevée dans le cours d'eau sur lequel ils se dérivent.

Il peut y avoir en outre des prises d'eau supplémentaires en aval, toujours alimentées par le même cours d'eau ou ses affluents. Il faut éviter surtout d'introduire des limons dans le canal. Pour cette raison, la prise d'eau principale s'effectue généralement dans un large bassin où les limons se déposent et que l'on drague périodiquement. (Ex. prise d'eau du canal de Bruxelles au Rupel dans le bassin de jonction alimenté par la petite Senne. Prise d'eau en Coire au canal de Roanne à Digoin - voir de St. Bas.)

§ 9. Alimentation artificielle par pompage.

L'alimentation artificielle par pompage ne se fait généralement que pour les biefs supérieurs des canaux à point de partage. Cependant, pour des canaux de plaine très importants, tels que le canal maritime de Bruxelles, l'alimentation par pompage peut être nécessaire, éventuellement comme ap-

Voies navigables.

point saisonnier.

Il y a deux méthodes différentes (1°) l'élevation par des usines centrales de pompage de l'eau d'alimentation dans le bief de partage ou dans des biefs élevés, à partir desquels l'eau d'alimentation descend de bief en bief, éventuellement par des régulateurs automatiques ou avec récupération d'énergie;

(2°) l'élevation de bief en bief depuis le niveau inférieur jusqu'au bief de partage.

La 1^{ère} méthode donne un meilleur rendement du pompage, à cause des grosses unités à pistons, mais produit un énorme travail en pure perte pour la fraction de l'eau d'alimentation des biefs inférieurs, qui doit redescendre.

Même la récupération de l'énergie hydro-électrique ne restitue qu'une partie de l'énergie perdue.

Le second système donne un meilleur rendement total, grâce à la facilité de transport de l'énergie électrique. Il lui doit son succès et il a généralement évincé la 1^{ère} méthode. A la station centrale de pompage de l'ancien système, on substitue la centrale électrique ou la sous-station ou le raccordement direct aux réseaux de la région. La centrale indépendante n'a plus de raison d'être que si elle est très puissante et que l'énergie électrique est peu abondante dans la région, ou bien si l'on peut créer sur le cours d'eau où l'on prélève l'eau d'alimentation une usine hydro-électrique d'une puissance suffisante.

A chaque écluse on installe un petit groupe moteur-pompe, de puissance décroissante d'aval en amont, le débit diminuant constamment. La distribution est généralement triphasée à haute tension, avec un transformateur à chaque écluse. La même ligne fournit l'éclairage et la force motrice pour la manœuvre des écluses et la traction. La combinaison avec la traction est excellente pour le facteur de charge de l'usine. La traction s'opère de jour, l'alimentation de nuit, le niveau étant légèrement exhaussé pour éviter un abaissement trop sensible en dehors des périodes d'alimentation. Cette méthode est aussi avantageuse en cas de raccordement à un réseau, les usines génératrices ayant intérêt à vendre du courant pendant la nuit et en dehors des heures de pointes. Pour le canal de Charleroi, on prélève l'eau de la Sambre qui est élevée dans le bief de partage par 10 stations de pompage

échelonnées entre Harchième au Pont et Luttre.

§ 10. Dépenses pour l'alimentation.

Les dépenses pour l'alimentation peuvent être très importantes, soit à cause des frais d'établissement (barrages, rigoles, usines) ou des frais d'exploitation (usines).

On cite que la création des réservoirs d'alimentation du canal de la Harne à la Saône a coûté 17.000.000 frs. or, soit 12% de la dépense totale. La question d'alimentation est donc une des questions essentielles dans l'étude d'un canal et qui est trop souvent négligée ou insuffisamment prise en considération. Elle exige aussi une étude et une confection soignée des étanchements, & l'aménagement de bassins d'épargne est efficace aussi.

Pour donner une idée des grandeurs, ci-après quelques renseignements au sujet d'une section de 150 km. du canal de Harne à l'Éms, y compris le bief de Dortmund.

Pertes par infiltration et évaporation (30 m. de largeur environ)	8 litres/" / km.
	soit $150 \times 0,008 = 1,20 \text{ m}^3/"$
Pertes aux écluses	0,20 "
Pertes pour 20 éclusages par jour	$\frac{20 \times 2600}{86400} = 0,60 "$
Supplément pour les infiltrations du débit, etc	0,60 "
	<u>Total</u> $2,60 \text{ m}^3/"$

L'alimentation se fait au bief de partage de 86,6 km. de Harne et Dortmund à Harvester, par pompage dans la Sappe de $1,712 \text{ m}^3/"$. Les pompes peuvent donner le double (3 pompes centrifuges de $0,80 \text{ m}^3$ de débit moyen et de $1,15 \text{ m}^3$ de débit max. pour 16 m. d'élevation moyenne). La commande est à vapeur, la puissance maximum voisine de 600 C.V.

En tenant compte de toutes les charges, le prix du m^3 utile d'après Hb. Hb. Jacquinet et Galliot est d'environ 0,01 fr. or par m^3 dans les divers systèmes, sauf avec les usines centrales à vapeur de pompage et les barrages en maçonnerie, où il est voisin de 0,03 fr. or ou même un peu supérieur.

Les progrès de la distribution de l'énergie électrique ont fait du pompage de bief en bief un des procédés d'alimentation artificielle les plus avantageux.

Bien entendu, dans un cas concret, il faut faire une étude des diverses méthodes.

Mais il semble bien que, sauf cas spéciaux, la construction de réservoirs servant uniquement pour l'alimentation n'est plus recommandable. Il peut être préférable d'établir des barrages dans des parties inférieures des vallées, en vue de la production d'énergie électrique, dont une partie sert à remonter l'eau de bief en bief.

§ 11.) Ouvrages d'alimentation et de vidange.

Les barrages et ouvrages de retenue fixes ou mobiles sont étudiés ailleurs, les principes d'établissement ne sont pas différents.

Les rigoles, aqueducs, tunnels et conduites sont analogues aux ouvrages d'adduction d'eau pour la consommation ou les usines hydro-électriques. Ces ouvrages sont étudiés ailleurs.

Les ouvrages de prise en rivière constituent souvent de petits barrages; il est utile de prélever le débit par un déversoir superficiel, pour éviter l'entraînement de matières solides. Dans le cas où l'on ajoute un débit artificiel d'alimentation, le déversoir peut être établi à une cote telle que le débit d'alimentation soit égal à l'excès du débit total sur le débit minimum à conserver en aval, et qui s'écoule par un orifice calibré ménagé dans le fond du barrage.

L'introduction dans le canal peut se faire par déversoir, pertuis obturés par des vannes levantes ou par aqueducs. Les déversoirs ou les aqueducs s'emploient pour l'alimentation de bief en bief, les aqueducs notamment pour l'alimentation automatique. Il n'y a pas de précautions particulières à prendre pour l'entraînement. Pour éviter les remous, l'arrivée des aqueducs doit être oblique par rapport au canal, la vitesse de l'eau réduite. Un ferret et un petit radier évitent les affouillements.

En cas d'aménée d'eau par rigoles, l'introduction dans le canal se fait par déversoir ou bien par passage dans un bassin de décantation pour déposer les sables, qui doivent être enlevés périodiquement. Si l'on veut éviter une alimentation surabondante, on dispose des vannes mobiles.

En cas de pompage, il faut éviter une introduction trop brusque à trop grande vitesse, à cause des remous et des affouillements. Il faut donc établir soit des diffuseurs en béton ou bien déverser les eaux dans des chambres maçonnées dont l'eau s'écoule dans le canal par un déversoir réglable.

Il est toujours avantageuse, tant pour la construction que pour l'entretien et surtout pour l'exploitation de pouvoir établir les ouvrages d'alimentation à proximité des écluses.

Dans le cas d'alimentation naturelle non réglée, qui peut être surabondante à certaines époques, il faut prévoir des ouvrages de décharge qui évacuent les eaux surabondantes dans les ruisseaux. Pour éviter de devoir faire des rigoles d'évacuation, on dispose généralement ces ouvrages aux têtes des siphons livrant passage aux ruisseaux sous le canal. Ces ouvrages sont constitués de déversoirs fixes ou mobiles, dans ce dernier cas munis de vannes, dont la manœuvre permet la vidange du bief en cas de besoin.

Pour la vidange, qui peut d'ailleurs s'effectuer par les écluses, on peut aussi disposer sur les siphons des bandes de fond, qui sont généralement des vannes cylindriques. On peut aussi disposer dans la digue du canal des tuyaux en fonte ou béton armé, munis de vannes manœuvrées de l'extérieur de la digue. Il faut prendre des précautions particulières pour éviter les infiltrations le long de ces ouvrages.

En réalité, l'emploi de tels ouvrages, qui constituent toujours des points dangereux, est à éviter et devient de moins en moins fréquent. La tendance actuelle est d'éviter autant que possible les vidanges de biefs et des dispositions peuvent être prises pour effectuer l'entretien sans chômage, ceux-ci deviennent ainsi exceptionnels.

Chapitre IV

~ Terrassements, étanchements et revêtements ~

§ 1. Terrassements. L'étude des cubatures et du mouvement des terres se fait comme il a été exposé dans le cours de terrassements en ce qui concerne les principes. Par suite de la prédominance générale des déblais et de la largeur relativement grande des voies d'eau, la compensation et les transports latéraux et verticaux acquièrent une importance plus particulière. Actuellement, l'emploi d'excavateurs mécaniques à grand débit, effectuant à la fois la fouille et la charge, éventuellement dans des wagons à voie normale; d'autre part le souci de mise en valeur des terrains voisins du canal en construction, font que l'on abandonne la méthode du dépôt en cavaliers bordant le canal et que l'on préfère transporter les terres pour combler les terrains bas, marécages etc... voisins du canal, construire les routes, détournements, rampes d'accès aux ponts, etc... Le problème de la compensation devient donc celui de trouver une utilisation avantageuse des terres dont on dispose. La prise de transport se détermine par le produit des masses par les prix effectifs des transports aux diverses distances. C'est surtout une question d'ordre pratique, mais il faut s'efforcer d'étudier une bonne répartition des terrassements pour réduire les frais de transport, assurer le rendement des excavateurs et éviter les débordements.

En ce qui concerne l'exécution des terrassements, par suite des particularités des canaux résultant des faibles pentes, larges profils, faibles hauteurs de remblai et de déblai (les tranches profondes sont exceptionnelles et se réduisent aux biefs de partage), c'est la méthode latérale qui s'impose, du moins pour tous les terrains qui peuvent s'enlever si l'excavateur. Ses avantages pratiques sont évidents, mais les désavantages aux points de vue de la qualité des remblais sont

particulièrement sensibles pour les canaux et donnent lieu aux précautions qui seront décrites plus loin. Ce n'est qu'en terrain rocheux très dur, que l'on débaille tout entier à la mine, ou en tranchée très profonde, que l'on pourrait entreprendre le débail frontal, dans le dernier cas en gradins. La méthode anglaise ne paraît pas intéressante, à cause des trop grandes largeurs de plafond et de la faible inclinaison des talus. Par suite de l'horizontalité du plafond, les tranchées profondes d'un bief de partage seront avantageusement attaquées par les deux extrémités. L'exécution des tunnels se fait par les méthodes ordinaires, exposées dans le cours de tunnels.

Tunnel du Rove : méthode belge avec une galerie axiale de faite et deux galeries de naissance, servant aux transports.

Comme machines de terrassements, l'excavateur à godets à chaîne guidée est particulièrement appropriée dans les terrains assez uniformes ; il travaille en butte ou en fouille. La pelle Clere travaille tant en butte peut convenir, mais si le terrain est dur, variable et présente des résistances locales, l'excavateur à cuiller travaille tant en butte convient le mieux. Le drag. line peut être utile pour la mise en train ou les travaux accessoires et l'on utilise fréquemment en Amérique les grandes dragues à câbles, exécutant une large lunette et des levées latérales. Le travail en fouille est évidemment préférable.

§ 2. Stabilité des terrassements

Elle présente un caractère particulièrement délicat à cause de la présence d'eau. Nous avons indiqué déjà qu'il convient de donner une faible inclinaison aux talus mouillés. Le profil quasi parabolique des sections assure même une inclinaison décroissante.

Mais à cause du contact de l'eau au pied du talus, il faut aussi adopter un coefficient de sécurité plus grand pour les parties non mouillées des talus, en d'autres termes compter sur une réduction de la hauteur dangereuse pour une inclinaison donnée. La question

devient très importante pour les tranchées profondes, où les éboulements sont très à craindre. Il faut les éviter tant que possible, parce que les inconvénients et les conséquences d'accidents en sont souvent plus graves pour les canaux que pour d'autres voies de communication (difficulté de déblai et de transport, extensions des éboulements et difficulté de réparation à cause de l'eau, etc...). Les talus concaves ou en gradins sont très recommandables. Observons que le terrain de flottaison et le chemin de balage constituent des gradins améliorant les conditions de stabilité des talus.

Mais la stabilité des talus de remblai est encore plus essentielle à cause des conséquences très graves, tant pour le canal que pour les terres riveraines, d'une rupture de digue.

Il faut donc particulièrement pour les digues de canal prendre toutes les précautions indispensables pour la stabilité des talus; notamment éviter toutes les circonstances susceptibles de provoquer des glissements, ainsi que les terrains compressibles. S'il n'est pas possible de s'écarter de certains mauvais passages, il faut résister à les considérer comme très coûteux et ne pas hésiter à dépenser ce qui est nécessaire pour assurer toute sécurité. C'est généralement la méthode la plus économique, car les accidents, les modifications et entretiens ultérieurs de sections mal établies finissent par coûter beaucoup plus cher. En cas de terrain compressible, on procédera, d'une manière quelconque, à une énergique compression du sol.

Je renvoie d'une manière générale au cours de stabilité des terrassements. Les talus extérieurs des remblais doivent être établis prudemment, de préférence concaves ou en gradins; surtout s'ils peuvent être mouillés au pied, soit par des crues, soit par infiltration du canal.

Les terres en excès peuvent servir à l'exécution de banquettes de consolidation des pieds des talus, les déblais rocheux peuvent servir au même but ou mieux, à l'exécution de contreforts de

soutènement, en évitant toutefois de créer de la sorte des appels d'eau.

Il est évident que les étanchements sont essentiels pour la stabilité des digues. Même sans entraînement de terre, les infiltrations compromettent l'équilibre des terres par imbibition. Les infiltrations au plan d'eau, généralement les plus importantes, sont également dangereuses. En vue des fluctuations du plan d'eau, il est donc nécessaire de monter les étanchements jusque près du sommet de la digue.

Il est essentiel aussi d'assurer une bonne liaison entre le corps du remblai et son assise, sinon les infiltrations sont particulièrement à craindre le long de la surface de réparation. Il est donc indispensable de débiter et dessoucher parfaitement, d'enlever toute la terre arable, d'entailler en gradins en cas de pente transversale et d'une manière générale, de contraindre la surface d'assise.

Il faut donc faire particulièrement attention aux dangers de glissement des canaux à flanc de coteau. Il faut assurer un étanchement parfait mais aussi veiller à l'action des eaux de ruissellement. Plutôt que d'établir des dipsons, le plus simple peut être de conduire les eaux des pentes directement dans le canal, en évitant toute interruption d'écoulement.

§ 3. Étanchement des remblais.

Il est particulièrement important, tant pour la stabilité des terrassements que pour la réduction des pertes d'eau. Il doit s'étendre non seulement à la masse du remblai, mais aussi à toutes les surfaces de discontinuité, principalement la surface d'assise. Ces surfaces de séparation, par la solution de continuité ou le manque de liaison, constituent des zones d'infiltration facile. Pour y remédier, il est nécessaire de prendre toutes précautions pour assurer une bonne liaison entre le remblai et sa surface d'assise. D'une manière générale, les brisures, notamment les chicanes, formées de tenons de remblai pénétrant dans l'assise, réduisent

fortement les infiltrations, par allongement du chemin et pertes de vitesse. Elles favorisent le colmatage du joint, qui est la condition essentielle de l'étanchéité. La chicane doit être évidemment parfaitement étanche elle-même. Il faut aussi que les joints, notamment des maçonneries, soient tels que le tassement produise une tendance au serrage et non à l'ouverture des surfaces de contact. Si les chemins d'infiltration des surfaces de séparation deviennent larges, il s'y produit des fuites importantes ou "renards" qui s'agrandissent sous l'effet de l'érosion. Ils peuvent provenir notamment de bouches ou debris végétaux pourris, ou de trous creusés par les animaux etc. Ces considérations justifient les recommandations du § précédent au sujet de la préparation de la surface d'assise.

En cas de profil mixte, l'étanchement du remblai doit évidemment être assis sur un sol imperméable, sinon il faut que la cuvette en déblai soit également étanchée et que l'étanchement en remblai recouvre l'étanchement de déblai, de manière à avoir un joint aussi étanche que possible.

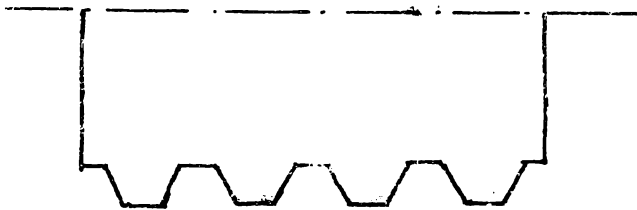
Les étanchements en remblai se font au moyen de terres. Le béton est exclu parce que, pour éviter qu'il ne se rompe sous l'effet des tassements, il faudrait armer les dalles ou leur donner des dimensions incompatibles avec l'économie. D'après ce que nous avons dit des terres dans le cours des terrassements, l'élément d'étanchéité est l'argile. Cependant l'argile pure ne convient guère, parce qu'elle se dilate au contact de l'eau et qu'elle se fissure par dessiccation. Si l'étanchement est percé, la fissure tend à s'agrandir et est très difficile à réparer.

Il faut donc un matelas protecteur, de préférence sableux et un filtre sableux sous la couche d'argile. De la sorte, s'il se produit une fissure, le sable du matelas protecteur tend à la colmater et les particules d'argile entraînées par l'eau tendent à colmater le filtre inférieur. Il faut préférer le mélange de sable et d'argile

dit "terre à corroi", généralement formée de 30 à 50 % d'argile et 70 à 50 % de sable. Il est imperméable et ne se fissure pas. Grâce à la présence du sable, les fissures se bouchent plus facilement. On y ajoute même du gravier et des pierres, formant ainsi un véritable béton de terre qui doit être très homogène.

Le gros sable est préférable au fin, dont la proportion doit être inférieure. Il semble que le sable ne joue pas seulement un rôle de squelette inerte, mais constitue aussi par sa masse un régulateur de l'humidité de l'argile. Selon certains, il semble que la présence d'un peu de craie ou de calcaire est avantageuse. Aussi en ajoute-t-on parfois au corroi, notamment sous forme d'arrosage au lait de chaux, avant compression. Mais cette opération n'est pas indispensable, ni même recommandable, car on peut craindre la dissolution ultérieure de la chaux. Le mélange doit être fortement comprimé par pilonnage ou corroyage, il devient alors très dur et cohérent. Le pilonnage est moins efficace et beaucoup plus coûteux que le corroyage (1 fr. 00 par m³) ; il ne convient que pour les petits ouvrages. D'après M. B. Jacquinet et Galliot, il est avantageux de substituer aux dames lourdes une masse en bois enmanchée manœuvrée à la volée. Mais les cylindres mécaniques s'imposent pour les grands travaux. Ils sont à vapeur, à essence ou électriques.

Les derniers types sont assez petits, très maniables et peu coûteux; ils permettent de corroyer des revêtements de faible largeur et une bonne répartition des chantiers par un assez grand nombre d'appareils. Les rouleaux électriques ne peuvent guère convenir que s'il



(Appareil de compression par
d'usage exposé à l'exposition de
la route à Milan).

existe à proximité une ligne de distribution électrique.

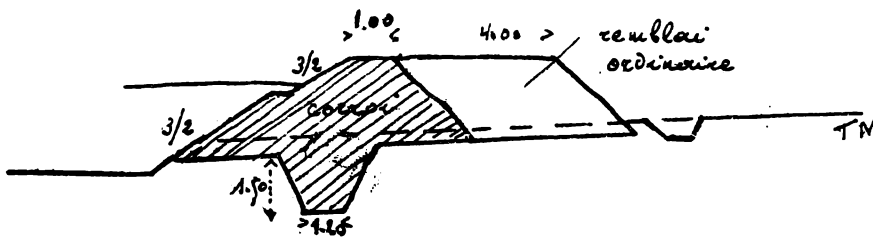
Les appareils à vapeur conviennent surtout pour les digues très importantes.

Ils ont 2.00 de largeur générale et compriment 700

à 800 m³ par jour. Les rouleaux à pétrole ont 1.30 m de largeur et effectuent 500 m³ par jour. La pression est de 20 kg/cm de pente environ.

Les cylindres lisses ont l'inconvénient de pénétrer dans le terrain au début de la compression. Pour éviter le palliatif de la surcharge variable, on emploie le cylindre cannelé, qui porte au début sur toute la largeur, mais qui s'enfonce de moins en moins au fur et à mesure de la compression. A la limite, lorsque la terre est très comprimée, le cylindre roule sur la face externe des cannelures. Un râteau assure le nettoyage constant des cannelures. La pression varie donc automatiquement du commencement à la fin de l'opération, que l'on arrête lorsqu'il existe encore de légères empreintes de cannelures, afin de faciliter la liaison des couches successives. Celles-ci ont 15 cm. d'épaisseur avant compression.

Le corroi faut être préparé dans des malaxeurs spéciaux, ce qui est coûteux. Il est préférable et suffisant de répandre les terres convenant pour le mélange et extraire par excavateurs autant que possible, pour être bien divisés. L'homogénéité du mélange est généralement assurée sur place pour un besoieage approprié, qui constitue en même temps un réglage. Le prix total de ces opérations en plus de tous les autres frais de terrassement, s'élève à 1.00 ou 1,50 fr. or. alors qu'il serait théoriquement avantageux de constituer tout le corps de la digue en couches comprimées, ce supplément de dépense fait limiter la compression à l'étanchement, qui ne comporte qu'une partie de la digue.

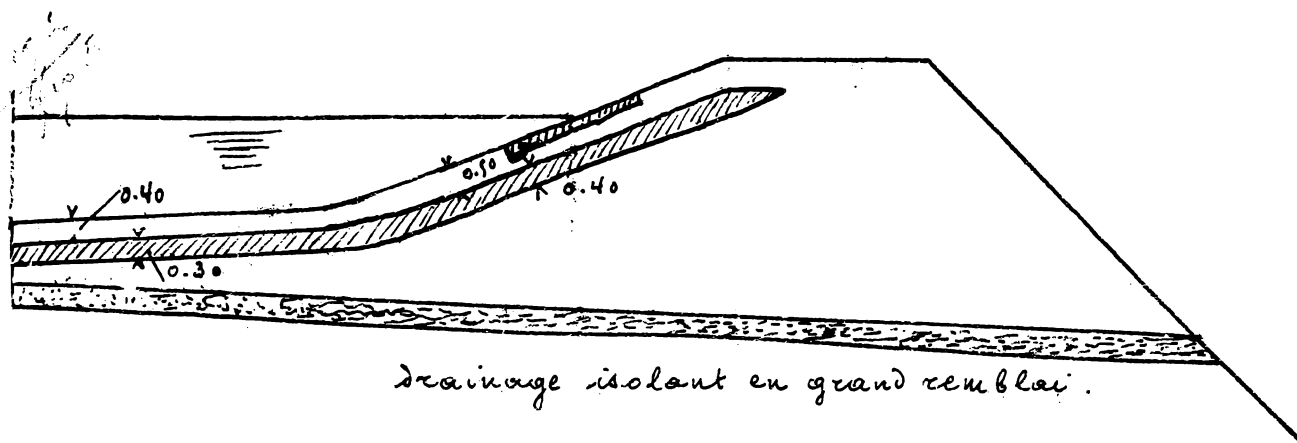


Le remblayage hydraulique donne des terrassements très étanches, la méthode est très économique.

économique lorsqu'on peut l'appliquer, par exemple pour des canaux latéraux.

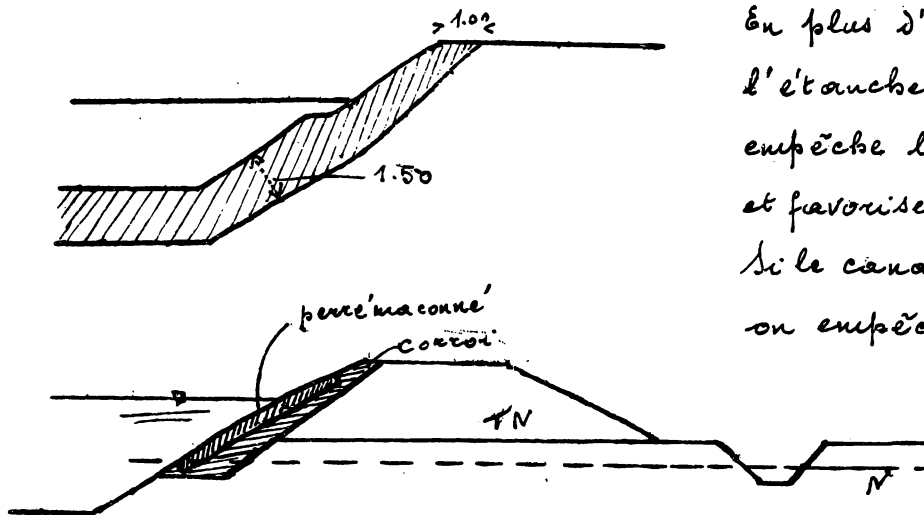
Un dispositif consiste à construire en corroi une digue limitée au talus intérieur du canal, à un couronnement de largeur minimum pour le passage du rouleau et un talus extérieur d'équilibre.

La digue est complétée vers l'extérieur par un remblai construit en terres ordinaires par décharge latérale. La majeure partie de la digue est en corroi, le système est donc très coûteux. Comme le corroi est construit en premier lieu, il peut se fissurer avant la mise en eau. En tout cas, la couche superficielle d'environ 0,75 à 1,00 m.



drainage isolant en grand remblai.

d'épaisseur est douteuse; elle est exposée d'ailleurs aux dégradations dues à la navigation. Aussi préfère-t-on, à l'heure actuelle, la méthode de la cuvette en corroi, que réalise à meilleur compte un étanchement plus complet et aussi durable. On exécute la majeure partie de la digue en remblai de la manière ordinaire, ensuite on constitue une véritable cuvette en corroi, sur tout le parcours de la section mouillée jusqu'à près du couronnement de la digue. Si le canal est en grand remblai ou que le terrain d'assise est très perméable. Sinon si le terrain est imperméable, il suffit que le corroi soit bien encastré dans ce terrain. Si le terrain est peu perméable, il faut que l'étanchement descende jusqu'à sous le niveau de la nappe phréatique. Au-dessus, on établit généralement un revêtement de protection pour éviter les dégradations de l'étanchement par les coups de gaffes etc. C'est, pour le plafond et les bases des talus, une couche de terre assez forte (0,50 m); un gazonnage ou un parçage pour les talus, etc. L'épaisseur normale de l'étanchement peut alors être de 30 ou 40 cm. Il est bon de disposer en dessous un filtre en sable ou gravier, ou en béton maigre, qui prend parfois l'importance d'un véritable empierrement sous le plafond des biefs en grand remblai.

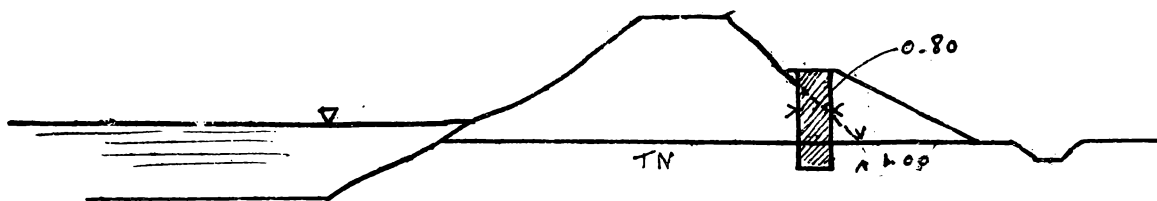


En plus d'une bonne assiette de l'étanchement, la couche filtrante empêche l'effet des appels d'eau et favorise le colmatage des fuites. Si le canal est en grand remblai, on empêche l'imbibition des remblai sous jacent en cas de fuite par l'établissement d'un drainage.

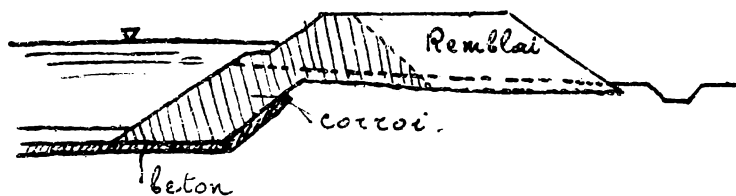
On peut aussi constituer la cuvette mouillée du canal en corroi, dont l'épaisseur normale est alors de 1.00 à 1.50 m.

En cas de fuite, la présence du sable et de l'argile provoque le plus souvent un auto. colmatage, que l'on peut activer par projection de terre argilo. sableuse dans la région de la fissure.

On peut aussi envisager l'étanchement par un noyau d'argile ou de corroi établi dans le milieu de la digue et pénétrant assez profondément



dans l'assise imperméable, ou jusque sous le niveau de la nappe aquifère si le terrain est perméable. Il n'y a aucune raison d'employer ce système pour un étanchement préalable, il n'a été employé que pour des étanchements après coup. Il présente des inconvénients sérieux : incertitude de confection, difficulté de déceler les fuites et de les réparer etc.



La pratique n'est donc pas recommandable, l'écran bétonne est préférable.

Si le profil est mixte et que le terrain d'assise est perméable, l'étanchement peut être uniforme

en remblai et de blai, mais il est fréquemment mixte, en corroi en remblai et en béton en de blai.

Il est toujours recommandable, tant en remblai qu'en de blai, en vue de permettre un approfondissement ultérieur du canal, d'établir l'étanchement de la cuvette assez bas.

§ 4. Étanchements en de blai.

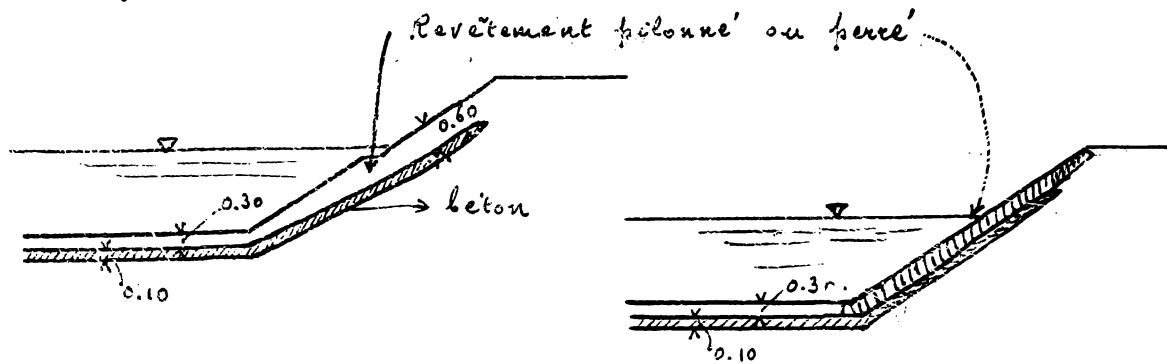
Ils ont un caractère sensiblement différent des étanchements en remblai et dépendent de la nature du terrain et du régime des nappes souterraines. Ils n'existent évidemment qu'en terrain perméable, meuble ou fissuré.

En terrain meuble peu perméable, on peut compter sur l'étanchement naturel par colmatage, à condition que la flottaison du canal soit toujours au dessus du niveau des eaux souterraines. Il y a donc toujours infiltration du canal vers la nappe souterraine, à très faible vitesse. Des grains de sable et les particules terreuses se déposent dans les interstices où les vitesses sont assez faibles et obturent les pores.

C'est la raison pour laquelle on constate que les pertes par infiltration d'un canal diminuent progressivement après la mise en eau. On peut activer ce colmatage par la création de troubles, c'est-à-dire l'apport de matières pulvérulentes, qui doivent être appropriées à la nature du terrain. Le colmatage doit se faire par succession de matériaux de dimensions décroissantes : gravier, gros sable, sable fin, argile. On ne peut colmater avec de l'argile qu'un substratum de sable assez fin. Une fuite de grandes dimensions doit être obturée tout d'abord avec du gravier et du gros sable ; du sable gros doit d'abord être étanché au sable fin. La cendrée est aversive, parce qu'elle est très anguleuse.

Le colmatage ne se fait pas nécessairement en surface, mais généralement légèrement en dessous, ce qui est favorable à sa conservation. Par sa formation, il est généralement mince, mais se bouche automatiquement s'il est percé. Mais il est détruit par

les sous-pressions, par exemple si les eaux souterraines s'élèvent au-dessus de la flottaison, donc, par exemple, en cas de baisse d'eau ou de vidange du bief.



Si le terrain est très perméable et que l'auto-étanchement est insuffisant, ou en terrain rocheux fissuré, il faut des étanchements spéciaux. Comme il n'y a pas de tassements à craindre, on emploie généralement une couche de béton compact de 10 à 15 cm d'épaisseur, recouverte d'un matelas protecteur de terre d'épaisseur suffisante sur le plafond. On peut recouvrir les talus de terre pilonnée pour éviter le glissement, ou d'un percé, mais il est encore plus simple de faire servir le béton de revêtement et d'étanchement; une épaisseur de 15 cm est suffisante pour que les dégradations ne soient pas à craindre (voir Canal de Charleroi, chap. II).

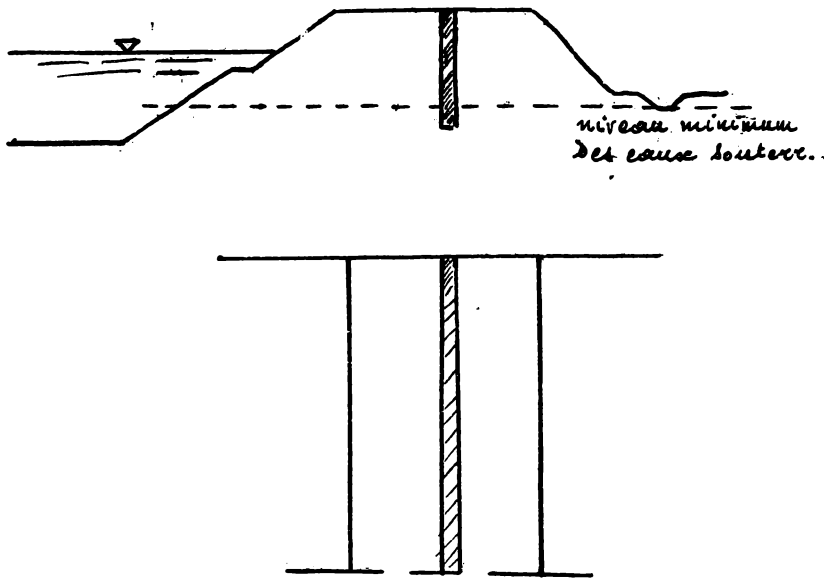
Il est toujours favorable d'établir une couche de fondation en sable, gravier ou pierreaille, cependant elle augmente sensiblement le prix et n'est pas aussi utile avec le béton qu'avec le corroi. Il est recommandable cependant d'obstruer les grosses fissures du terrain. Le béton a l'avantage de réduire les terrassements et de donner plus d'étanchéité que le corroi.

L'étanchement complet consiste à exécuter une véritable cuvette en béton jusqu'au-dessus de la flottaison ou se raccordant avec l'étanchement des digues. Si le terrain n'est pas trop perméable et que la nappe phréatique est assez haute, ce qui crée une assez faible charge d'infiltration, on peut parfois se contenter d'un étanchement incomplet, qui consiste à étancher depuis la flottaison jusqu'en

dessous du niveau minimum des eaux souterraines. Cet étanchement peut être alors combiné avec les revêtements de talus, par exemple, un parement maçonné d'épaisseur suffisante (0.75 m), aux environs de la flottaison, et des dalles de béton rapportées ou coulées sur place, en dessous de la flottaison minimum. Les infiltrations, qui ne peuvent plus se produire qu'en dessous de l'étanchement, sont sensiblement réduites et diminuent encore avec le colmatage, qui devient plus actif à cause des faibles vitesses (voir cours d'hydraulique appliquée).

De cette méthode dérive le procédé d'étanchement de l'écran bétonné, imaginé par M^e Galliot, que l'on applique après coup aux sections des canaux dont les infiltrations sont excessives. Le procédé s'applique donc aux remblais aussi bien qu'aux déblais, puisque le tassement est fait. Dans l'axe longitudinal des digues, on enfonce quelques palplanches jointives, de 10 à 15 cm d'épaisseur, jusqu'en dessous du niveau minimum des eaux souterraines ou sous le plafond du canal. Ensuite on retire une à une les palplanches et on remplit le vide de béton tassé. On exécute de la sorte un écran étanche continu. On peut aussi substituer au béton de ciment du béton de chaux, ou même du béton de terre, mais le procédé est moins certain et la dépense risque d'être faite en pure perte. On ne peut guère dépasser 3 à 3.50 m de profondeur en terrain non ébouleux. On emploie actuellement des palplanches spéciales Daubin-Boutet formant moule. (Voir Rapport de M. M. Botte et Garmentier. Congrès international de navigation du Canal 1926).

Les parois d'étanchement en béton doivent être faites en béton bien étanche, donc compact et plastique, bien comprimé. Le damage en couches minces sur le sol au moyen de dames lourdes est peu adéquat, il est préférable d'employer des bottes maniées à la roue et agissant par la vitesse plutôt que par la masse, notamment des bottes flexibles en cuir appelées savates. Le rendement et la compression sont meilleures qu'avec des dames. On pourrait aussi envisager des modes de confection dérivés de la technique américaine des



routes en béton et on a effectivement imaginé ou employé des machines, notamment pour le bétonnage des talus. Mais, sauf pour de très grands canaux et de longs biefs droits, la méthode paraît peu pratique. A l'heure actuelle, il semble que la méthode qui convient

le mieux est la mise en place par goulottes en tôles couchées sur le talus. Le béton, de consistance appropriée, est amené par bennes de couville d'un chantier semi-fixe de confection du béton, ou, déversé directement d'une bétonnière mobile circulant sur la rive. On peut opérer le dosage par poilettes pneumatiques. Le ciment-gun semble aussi très approprié, mais il semble que la gunite est difficilement très homogène et présente souvent des défauts locaux. Cet inconvénient, qui peut être bénin pour des ouvrages toujours accessibles, est capital pour un étanchement de canal, dont les défauts ne se constatent qu'après la mise en eau, alors qu'il est inaccessible. Pour cette raison, il faut évidemment employer les méthodes les plus sûres et ne pas risquer de compromettre le résultat pour une faible économie. D'ailleurs, il n'est pas certain que le ciment-gun réalise une économie. L'emploi de béton fluide mis en place par gravité ne convient ni au point de vue technique, parce qu'il est poreux et perméable sous faible épaisseur, ni au point de vue pratique, parce que ce mode de mise en place n'est avantageux que pour les grandes masses concentrées.

Or, ici il s'agit d'une faible épaisseur de béton sur une très grande étendue.

Parfois la dalle de béton reçoit un enduit de mortier de ciment riche,

il semble que cette pratique est inutile si le béton est bien compact (composition granulométrique soignée) et bien damé, de sorte que le mortier reflue. Un triple goudronnage à chaud est recommandable et peu coûteux. L'emploi d'une chape en feutre asphalté paraît excessive, on y a recours dans certains cas spéciaux.

Des sous-pressions importantes doivent être compensées par une surcharge suffisante du dallage ou, si cette méthode n'est plus possible à cause de l'importance des sous-pressions, il faut établir un véritable drainage sous la paroi, en relation avec des clapets s'ouvrant vers le canal et qui fonctionnent automatiquement pour établir l'équilibre des pressions sur les 2 faces. L'efficacité et la sécurité de ces dispositifs sont évidemment précaires. Ces cas d'espèces, d'ailleurs exceptionnels, demandent des études spéciales.

Le point très délicat est celui des tassements. Des ruptures se produisent par exemple à la limite du déblai et du remblai. On peut armer les points faibles, ce qui augmente beaucoup la dépense. La question des dilatations peut être aussi importante si l'étanchement n'est pas entièrement recouvert d'une épaisse couche de terre. Pour cette raison comme pour éviter les fissures de retrait, il est recommandable de former l'étanchement de dalles bétonnées sans reprises, de 5 m. environ de dimension maximum, dont les joints sont rendus étanches au moyen de mastic d'asphalte. Les ruptures par tassement sont aussi rendues presque impossibles de la sorte.

§ 5. Contrôle des étanchements.

En déblai, il n'y a guère d'autre moyen que de contrôler les fuites par infiltration de la manière indiquée. S'il permet difficilement de localiser les fuites, il permet souvent d'en déterminer le niveau. On peut faire des observations sur les fruits ou ruisseaux voisins, éventuellement au moyen de solutions salines, de fluorescéine, etc. Les grosses fuites sont exceptionnelles, leur niveau le plus probable est aux environs de la flottaison et au-dessus de la nappe aquifère. On peut toujours espérer colmater au moyen de troubles, sinon établir un écran

bétonné.

En remblai, le contrôle est plus facile, par le débit du fossé extérieur. Des petits déversoirs mobiles peu distants permettent de localiser assez étroitement les fuites. Les très grosses fuites ou renards, toujours possibles, se remarquent très vite, mais comme elles donnent lieu à des ruptures rapides de digues, elles doivent être décelées très tôt et aveuglées sans tarder. L'emploi de terre ou de gravier dans des sacs, de pierres enveloppées de treillis métallique, etc ; pour empêcher l'entraînement des matériaux, est le plus recommandable. Les sacs de ciment, outre qu'ils sont coûteux, constituent, lorsqu'ils ont fait prise, des discontinuités autour desquelles se produisent de nouvelles infiltrations peuvent se produire. Lorsqu'on a bouché avec des sacs et des amas de pierres sèches, on essaye de colmater au sable et à l'argile.

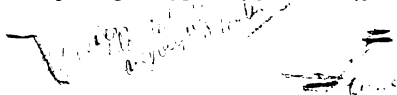
§ 6. Revêtements de talus.

Les revêtements peuvent remplir des offices divers :

- 1° assurer la stabilité des talus mouillés sous un angle convenable dans les terrains mauvais ;
- 2° protéger les étanchements et même constituer l'étanchement ou y contribuer.
- 3° protéger les talus contre les dégradations provenant du courant, notamment du remous des remorqueurs, ainsi que des chocs etc.

Dans les différents cas, les dispositions sont très analogues. Au point de vue de la stabilité, les perrés agissent, comme sur les talus secs, par leur poids. La section dangereuse est au pied et le profil recommandable est donc trapèze. La maçonnerie sèche suffit et elle a l'avantage d'éviter les sous-pressions d'eau pour éviter l'érosion par les joints, entre les terres et le feré, il faut toujours disposer un filtre de pierreaille ou gravier. Cette règle est d'ailleurs générale pour tous les revêtements de berges non étanchées ou susceptibles de subir des sous-pressions.

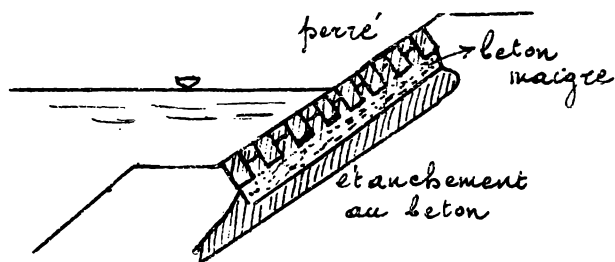
Tous avons déjà indiqué précédemment que les étanchements mêmes peuvent constituer les revêtements, à condition d'être d'épaisseur suf-



risante pour ne pas craindre les dégradations. Dans les traversées des rilles, les ports et aux abords des ouvrages, on emploie souvent des revêtements maçonnés importants, qui constituent presque des murs étanches et qui doivent être raccordés à l'étanchement du plafond, s'il existe. Si l'on dispose un ferri de protection sur un étanchement, il est recommandable de le maçonner. Il faut qu'il descende jusqu'au plafond pour que son pied soit bien soutenu, car il n'est pas permis de lui donner une fondation surélévée sur piquets, qui perceraient l'étanchement. S'il s'agit de corroi, on pose le ferri sur un mince lit interposé de sable graveleux. S'il s'agit de béton, on interpose une couche de béton maigre d'assez. Le pied de revêtement peut prendre appui sur l'étanchement par un ergot, sans descendre jusque sur le plafond du canal.

Les deux premières fonctions des revêtements sont réalisées le plus simplement par des terres pilonnées et ensemenées, des gazonnages ou des clayonnages en losange (éviter de percer les étanchements par les piquets). Les systèmes économiques sont suffisants pour les canaux de navigation sans courant creusés dans des terres ordinaires.

Tous étudierons ailleurs les revêtements des canaux à fort courant de débit. Pour les canaux de navigation, le remous des bateaux, surtout des remorqueurs, peut produire des dégradations au niveau du



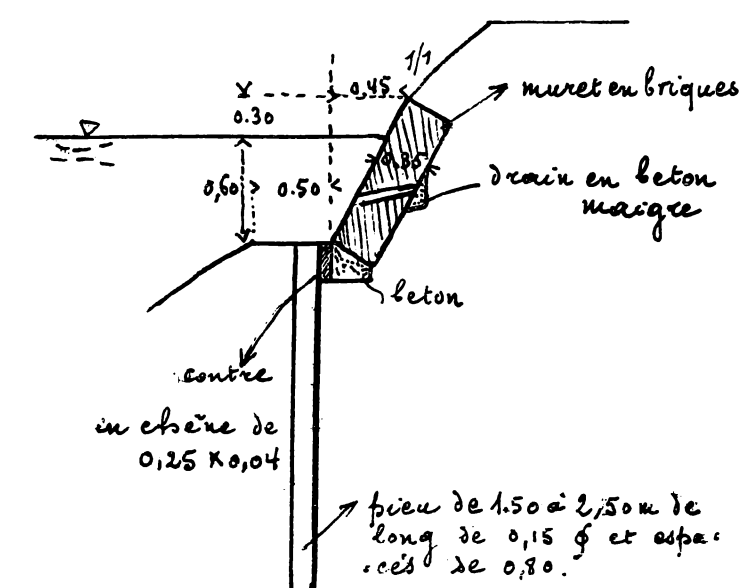
plan d'eau, de même que les coups de gaffe. La petite brique des canaux français, peu sous le niveau de la flottaison, a pour but d'amortir les remous et de permettre l'adou-

cissement du talus. On peut y planter des roseaux, qui forment une bonne protection. Elle permet aussi d'y asseoir ultérieurement un revêtement en gazonnage à queue, fascinage, clayonnage ou ferri.

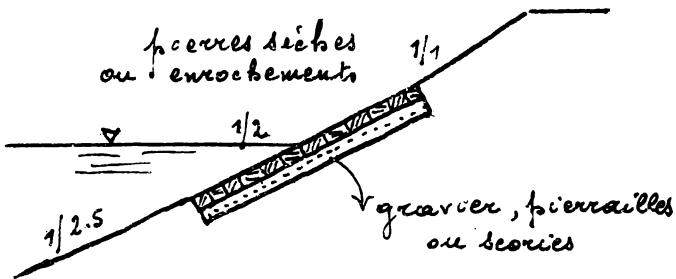
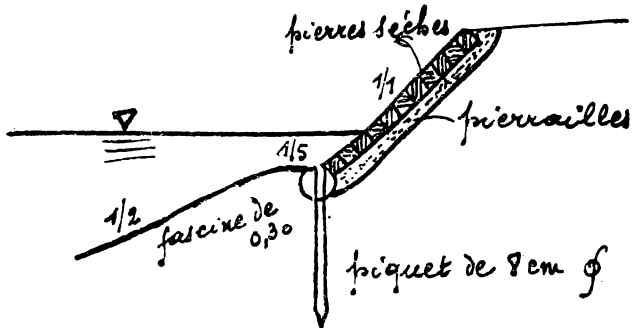
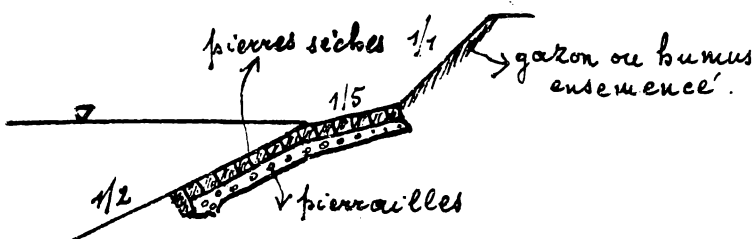
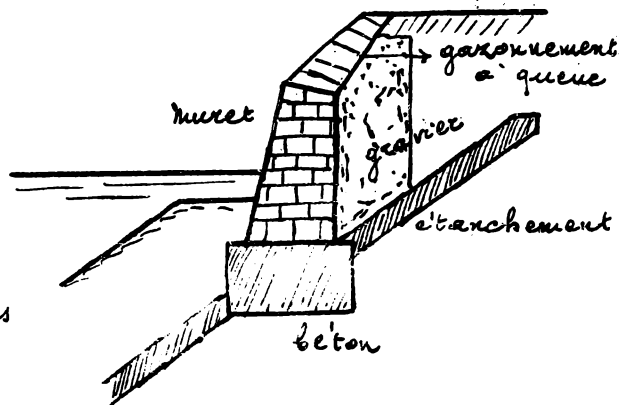
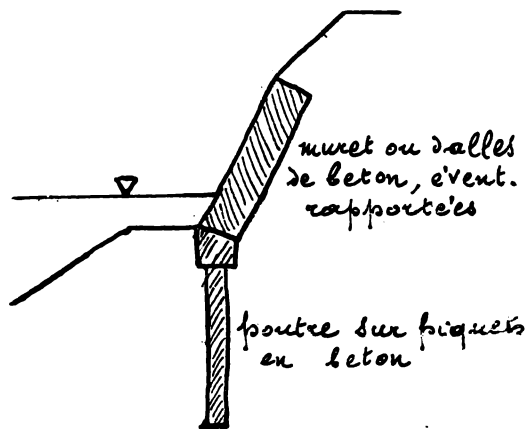
Très souvent cependant, surtout en cas de navigation mécanique assez

importante, on établit d'emblée un revêtement qui règne le long de la ligne d'eau suffisamment au dessus et en dessous pour tenir compte de la zone d'adaptation et des fluctuations du plan d'eau.

Il est avantageux de faire déferler les ondes; un dispositif intéressant à ce propos est celui d'une petite berme en pente douce au niveau de la flottaison. Au canal maritime de Bruxelles, on dispose un petit muret en béton de profil concave destiné à briser les ondes et à les rejeter en arrière.



Muret de flottaison du canal de St Quentin



Dans tous ces revêtements, il est essentiel d'éviter les affouillements au pied (profondeur suffisante) et de le retenir solidement.

Généralement, le revêtement est supporté ou retenu par des piquets, surtout si le débâissement par les coups de gaffe est à craindre; sinon, on dispose une semelle. Il arrive qu'il s'appuie sur un étanchement inférieur en béton. Une poutre de base en béton appuyée sur de petits pieux bétonnés dans le sol paraît avantageuse. Pour éviter les affouillements derrière le revêtement, surtout s'il est perméable, il faut disposer un filtre en pierraille.

Comme matériaux, on emploie les pierres dures non gélives, en enrochements, libages ou moellons, les briques non gélives, le béton. Il faut craindre la gélivité du béton, surtout au voisinage de la flottaison, ainsi que la dislocation possible d'un revêtement mince par boursofflement du sol gelé; il faut veiller à utiliser un béton particulièrement étanche; éventuellement en dalles ou palanques montées d'avance. Le béton ne convient pas dans les zones marécageuses, à cause de l'altération du ciment.

§ 7. Chemins de balage - etc.

Les chemins de balage doivent être aménagés pour le pied des chevaux, généralement un revêtement en pierraille, gravier ou pavage grossier. Pour la traction mécanique, il faut des plateformes ou revêtements appropriés. Il faut un bon drainage: fosse de garde et pente de 3% vers le canal. Il est très recommandable d'effectuer des plantations le long des canaux, surtout des taillis, pour protéger contre les vents violents. Les taillis facilitent donc la navigation et ombragent le chemin de balage. Les osiers protègent les berges contre les dégradations par les coups de gaffes, les abordages à la rive, etc, mais il faut éviter un développement de plantes aquatiques, qui réduit la section.

Quand les digues contiennent des corrois d'étanchement, il faut éviter de planter de grands arbres à racines pivotantes susceptibles de percer les corrois.

Les escaliers, caniveaux etc seront de préférence bordés de petits perrés. Les lignes télégraphiques et de force ainsi que les bornes kilométriques et éventuellement les bornes d'amarrage seront disposées vers les bords extérieurs des chemins de balage ; afin de permettre le passage des câbles et de ne pas gêner la circulation. Les bornes doivent recevoir une solide fondation en béton ; on n'emploie plus quère que les bolards en fonte ou béton armé.

§ 8. Canaux de navigation à courant (dérivation)

Si le canal doit débiter constamment, on lui donne un fond en pente convenable. S'il débite accidentellement, comme le nouveau canal de Charleroi à Bruselles, qui, en aval de Hoal, doit débiter une partie des eaux de la Senne, le plafond est horizontal, mais la revanche des berges doit être suffisante en tenant compte de la pente superficielle. Sa section se détermine d'après le débit maximum et la vitesse maximum admissible, notamment si la navigation ne peut être interrompue en aucun cas. Il faut tenir compte de la réduction de section par les bateaux se croisant ; il en résulte évidemment une valeur de n supérieure à celle des canaux sans courant et que l'on répercute de préférence sur le tirant d'eau.

Tenant compte de l'action érosive de l'eau en mouvement, il faut réduire la pente des berges, surtout au pied et adopter de préférence le profil parabolique.

Il y a cependant une différence essentielle avec les cours d'eau naturels, c'est que le débit maximum est bien déterminé, que l'exploitation du canal règle le débit comme il veut et que l'eau introduite peut être débarrassée de la majeure partie des matériaux charriés. De cette manière, par limitation de la vitesse, on maintient dans des limites modérées l'érosion aussi bien que les dépôts. On établit des étauchements, s'il faut éviter les pertes de débit, et des revêtements pour fixer le lit.

Des dispositions spéciales facilitant la navigation : protection contre le vent par des taillis, balage mécanique etc... sont évidemment

très adéquats.

Il est nécessaire d'établir à l'origine de ces canaux des ouvrages de prise d'eau et d'accoler aux écluses des ouvrages spéciaux ou déversoirs destinés à permettre l'écoulement du débit. Les ouvrages de retenue deviennent donc analogues à ceux d'une rivière canalisée.

Généralement, les déversoirs doivent permettre de régler le débit d'une manière déterminée, notamment lorsqu'il s'agit d'irrigations ou d'écoulement de crues. Au canal de Charleroi, le déversoir de la prise d'eau de Senebecq (voir planche 23), par laquelle les crues de la Senne sont admises dans le canal, et ceux des écluses situées en aval comportent respectivement huit et trois pertuis maçonnés, de 2,50 et 2,00 de largeur, fermés par des vannes glissantes en bois manoeuvrées par crics et crémaillères manoeuvrées à main. Le débit est de $66 \text{ m}^3/\text{s}$. Une prise d'eau supplémentaire de 24 m^3 se trouve en aval à Anderlecht. En dehors des périodes de crue, les prises d'eau et déversoirs peuvent contribuer à l'alimentation du canal par les eaux de la Senne.

Dans la section normale en amont de Hal, l'évacuation du débit max. correspond à une vitesse moyenne de $1 \text{ m}/\text{s}$. Cette vitesse est admissible pour la navigation. La vitesse de fond correspondante, d'environ $0,60 \text{ m}/\text{s}$ est satisfaisante aussi pour des sables assez gros ou des graviers. La vitesse doit être en tous cas assez réduite pour satisfaire aux deux conditions de navigation et de stabilité du lit. Si le terrain est très affouillable, on est conduit à établir des revêtements complets.

Tous retrouvons ces caractères dans le Grand Canal d'Alsace, canal latéral au Rhin projeté de Huningue à Strasbourg, en territoire français. Sa chute totale est d'environ 95 m . Le projet prévoit la dérivation par ce canal d'un débit maximum de $850 \text{ m}^3/\text{s}$ prélevé sur le débit du Rhin, en vue de récupérer aux écluses une importante énergie hydroélectrique. Ce canal sera construit par tronçons; on établit tout d'abord le premier lieu de

Hembs et l'usine située en ce point ; en aval on reliera au Rhin par un canal de fuite provisoire. Voir planche 24, la section du canal qui doit permettre la navigation des chalandes et des grands remorqueurs à aubes, et écouler un débit de 850 m^3 sous une pente de fond de 8 cm. par Km., une vitesse moyenne de 0,70 et une vitesse de fond de $0,50/\text{m}/\text{s}$ dans le bief de Hembs. On y reconnaît les dispositifs d'étanchement, de revêtement, etc.

Chapitre V

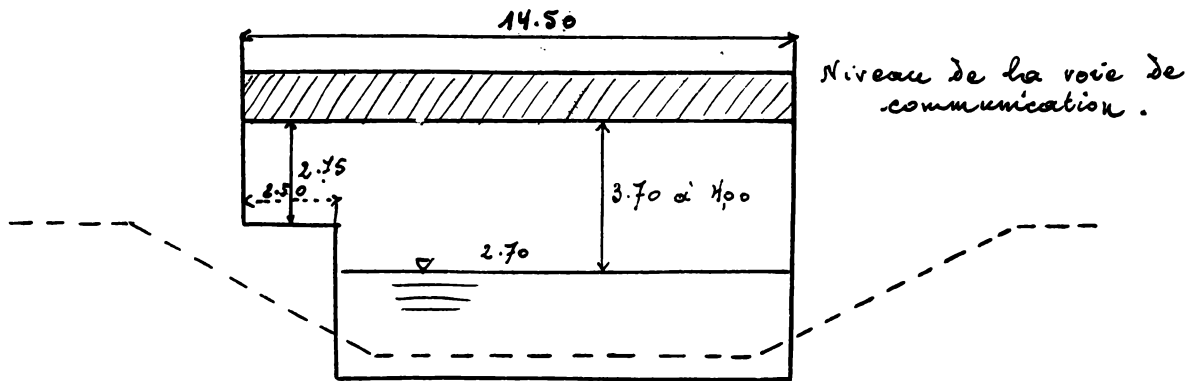
Rencontre des voies de communication et cours d'eau.

§ 1. Rencontre des routes et chemins de fer.

Les canaux étant le plus couramment en déblai, il est généralement possible de les faire passer sous les routes et chemins de fer. Les ouvrages doivent respecter le gabarit du canal et le tirant d'air. Pour réduire la portée, on adopte le plus souvent la section rectangulaire et on accroît le mouillage, surtout si la hauteur libre est limitée, c'est-à-dire en cas d'emploi de pont métallique. Cette disposition n'est pas intéressante en cas d'emploi de routes en maçonnerie et elle exige une fondation plus profonde. On peut alors conserver la section normale et établir une route du type à culées perdues, (voir cours de pont en maçonnerie.).

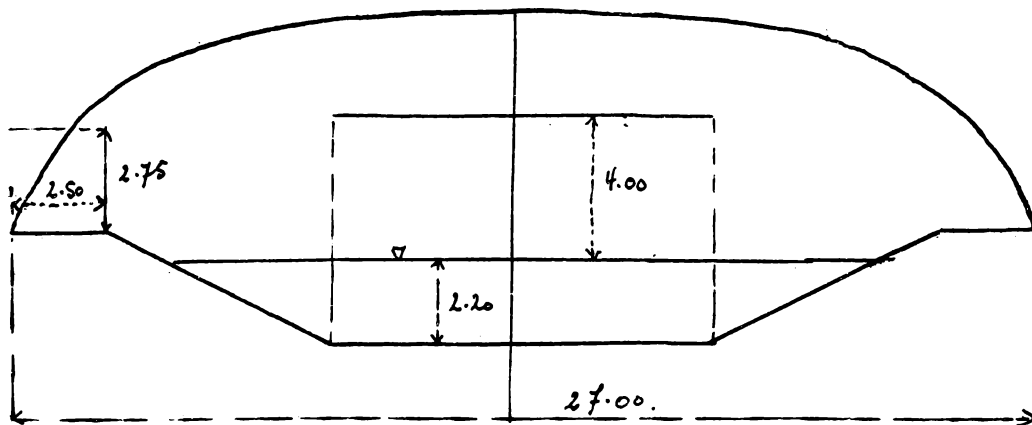
Dans les villes, à cause des inconvénients des rampes ou de l'impossibilité d'en établir, on établit souvent des ponts mobiles. Ces ouvrages ont de multiples inconvénients ; ils constituent des obstacles à la circulation sur les deux voies et sont coûteux de construction, d'entretien et d'exploitation. Aussi la tendance actuelle est-elle de les éviter

autant que possible, surtout à cause des obstacles qu'ils apportent à la circulation routière. Comme il y a toujours une revanche d'environ



1.00 par rapport à la flottaison, on voit que la hauteur des rampes n'est jamais beaucoup supérieur à 3 m. 50. Les difficultés ne se présentent qu'à l'aval des biefs.

Il n'y a rien de particulier à dire au sujet de l'étalement des ponts de chemins de fer, sauf qu'il faut que l'angle de rencontre des 2 voies soit aussi voisin que possible de 90°. Cette condition doit être réalisée par un tracé judicieux et un choix approprié du point de rencontre, car les déviations sont malaisées pour les 2 voies.



Pour les routes, la même condition est plus facile à réaliser, leur tracé étant plus simple et les détournements plus faciles. On fixe souvent l'emplacement des écluses au point de rencontre de routes, tant pour des questions de facilité d'accès des ouvrages que pour la facilité de franchissement. On peut toujours établir un pont fixe, de faible portée sur la tête aval de l'écluse ; cependant c'est une gêne pour la

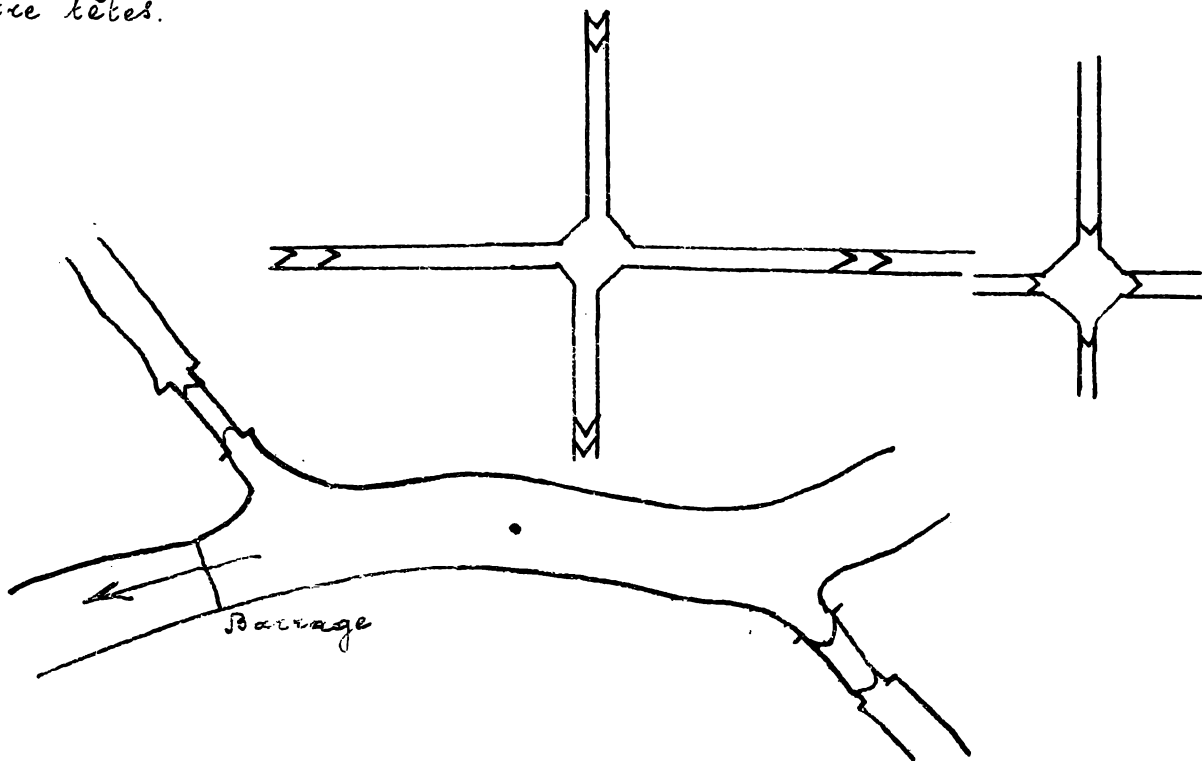
navigation. Pour les ponts métalliques, les ponts à poutres droites ou les ponts à béquilles conviennent le mieux.

Dans la traversée des vallées, il arrive que les canaux franchissent par dessus les chemins de fer, au moyen de pont-canaux. Ces ouvrages sont coûteux et délicats, aussi pour les hauteurs pas trop grandes préfère-t-on dévier les routes pour leur faire franchir le canal par dessus. Mais s'il y a un remblai de grande hauteur, les routes et les chemins de fer peuvent passer sous le canal par un passage inférieur analogue à un tunnel. Il n'y a qu'à prendre des positions appropriées pour éviter les tassements et assurer un bon étanchement du canal, dont on conserve la section normale, vu la faible portée de l'ouvrage. (Voir de Mas, Canaux (p. 103 et suivantes)).

§ 2. Rencontre des cours d'eau.

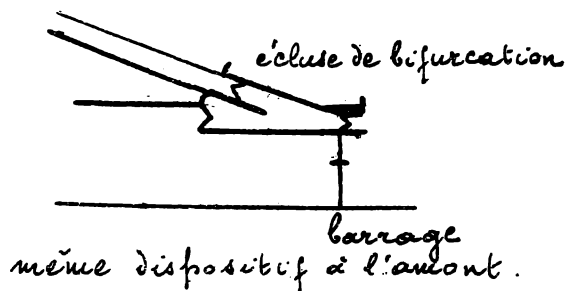
Cette question présente de multiples aspects; navigation, écoulement du débit et crues.

Au point de vue de la navigation, si les voies d'eau qui se rencontrent sont des canaux, on établira autant que possible des biefs de rencontre de même flottaison. Il ne faut pas alors d'ouvrages spéciaux sauf des élargissements permettant les virages et dont les berges sont généralement terrassées. On peut aussi envisager une écluse carrée à quatre têtes.



Si les niveaux des voies navigables sont différents, notamment parce que l'une d'elles est une rivière, dont le niveau est donc variable, il faut deux écluses ordinaires — la navigation emprunte une partie du cours de la rivière, qui doit non seulement être navigable, mais dont le talweg doit réunir les deux écluses. Cette condition est difficile à satisfaire et on établit généralement un barrage en aval dont le relèvement produit la profondeur voulue entre les deux écluses. Si le cours d'eau est canalisé, il peut y avoir un bief commun et deux écluses de bifurcation, à trois portes. Cette disposition est complexe et n'est guère praticable que pour de faibles chutes, à cause des fortes consommations. L'inconvénient n'est cependant pas capital si le débit du cours d'eau est suffisant.

L'objection a plus d'importance pour une écluse carrée, qui ne pourrait être établie sur un cours d'eau à débit que moyennant l'adjonction d'un siphon, le débit ne pouvant passer par l'écluse.



aussi les écluses carrées ne sont-elles à envisager qu'au croisement de 2 voies d'eau sans courant et la forte consommation d'eau des écluses est alors un inconvénient capital. Ces dispositions,

qui ont reçu peu d'application dans le passé, pour de faibles chutes et de petits tonnages, sont à vrai dire périmées et ne conviennent pas au trafic intense moderne.

C'est donc la solution des deux écluses simples qui est la plus pratique, les flottaisons des biefs contigus à la rivière seront telles que la chute ne change pas de sens, donc au-dessus du niveau des plus hautes eaux pour un canal à point de partage inférieur; comme ci-dessus en aval ou aussi en dessous des plus basses eaux en amont pour un canal latéral. Ces solutions satisfont aux points de vue de la navigation, de l'écoulement des débits et de l'alimentation, tout au moins en période d'eaux normales. Mais on voit que la navigation est affectée par les crues, qui peuvent

en causer l'arrêt et, en outre, que les ouvrages peuvent être exposés aux effets des inondations. C'est la raison pour laquelle les canaux traversent généralement les cours d'eau navigables ou non susceptibles de fortes crues par le moyen de ponts canaux ou tâche de disposer la flottaison à un niveau suffisant pour pouvoir établir un pont canal en maçonnerie à arches multiples. La navigation du canal est ainsi rendue complètement indépendante des crues, mais il n'y a pas de liaison entre les voies d'eau. Si cette liaison est désirable, elle peut être établie par un canal de raccordement, une écluse à forte chute ou un ascenseur. Pour l'alimentation, il faut installer des usines de pompage (voir usines de la Égypte). Toujours enfin aussi qu'on a fait franchir des canaux par des rivières au moyen de ponts, qui doivent permettre l'écoulement des crues.

§ 3. Traversée des lits d'inondation.

L'établissement d'un canal dans un lit d'inondation est une sujétion grave, que l'on cherche à éviter. Au croisement d'un cours d'eau, cela se réalise par un pont canal de longueur suffisante. Pour un canal latéral, il faut s'éloigner suffisamment de la rivière, ce qui n'est pas toujours possible au point de vue technique ou économique. On peut aussi effectuer des détournements du cours d'eau, notamment des rectifications de lit dans les boucles. Le lit de la coupure doit être bien calibré et présenter un lit mineur et un lit majeur suffisants, de manière à éviter l'érosion de la rive située vers le canal, qui pourrait en menacer la rive. En d'autres termes, le détournement doit effectivement et d'une manière durable mettre le canal hors d'atteinte des inondations.

Une difficulté se présente si le canal recoupe ou suit en partie l'ancien lit.

C'est une amorce de pertes importantes par infiltration suivant l'ancien lit, surtout s'il contient beaucoup de gravier perméable. Il faut curer l'ancien lit à fond très vif et en gradins ou chicane, substituer la cunette du canal sur le terrain ainsi préparé

par une épaisse couche de corroi jointive avec l'étanchement courant et débordant largement, par des joints contrariés, sur le bon terrain environnant. On conserve parfois une partie de l'ancien lit comme bassin de refuge, virage etc...

Dans la traversée des lits d'inondation, le canal est protégé par une ou des digues contre le déversement des eaux de crue dans le canal et par dessus le canal. Il faut donc que ces digues aient leur couronnement à une cote suffisante au dessus des plus hautes eaux connues. Encore faut-il que le lit d'inondation ne soit pas réduit par les digues dans une mesure susceptible d'élever le niveau des crues. Il faut procéder à une étude très attentive et chercher par des améliorations locales et des suppressions d'obstacles, à améliorer l'écoulement des crues, ce qui est fréquemment possible.

La digue est contiguë au chemin de halage et fait corps avec celle du canal. Au dessus du chemin de halage, elle est constituée vers l'extérieur par une puissante couche de corroi (2 m. par exemple), descendant jusqu'à 1 m. environ en dessous du chemin de halage. En dessous, l'épaisseur de la digue est telle que les infiltrations sont peu à craindre.

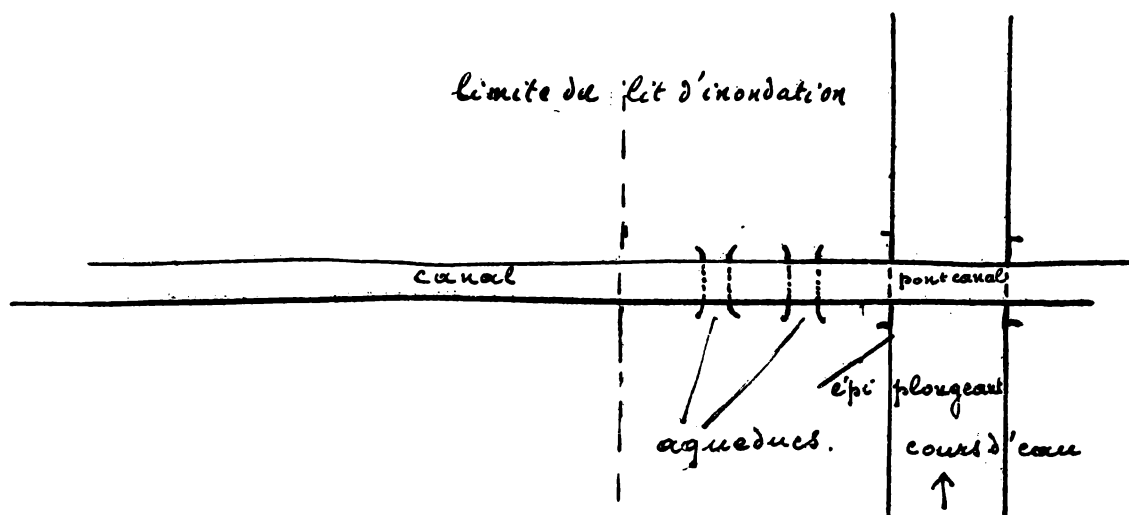


La grande épaisseur de corroi est due à ce que la couche superficielle (de 0,75 m environ), tantôt immergée, tantôt à sec, n'est pas active pour l'étanchéité. Un danger à éviter autant que possible est celui des sous-pressions susceptibles de détruire l'étanchement du canal.

Le débordement des crues par dessus la digue ou par une brèche de la digue est un accident grave, car l'eau de crue introduite dans le canal y apporte des dépôts, dégrade les berges et enfin cherche généralement un point de sortie en se déversant par dessus

la digue opposée. Ce sont donc généralement d'importantes destructions de digues qui en résultent. Ses écrans latéraux peuvent être utilement employés pour renforcer les digues aux points menacés. Lorsque la protection du canal contre les crues extraordinaires est douteuse, on peut localiser le débordement et le déversement en des points favorables et non dangereux, par de larges aqueducs barrés par des poutrelles. (Canal de la Meuse à la Saône). Ils fonctionnent comme déversoirs quand les poutrelles ne sont pas retirées et on peut régler le débit en retirant ou remettant des poutrelles. Aux points dangereux, on établit les digues assez haut et très solidement.

Il faut évidemment protéger les digues contre les effets d'érosion du courant d'inondation, ce qui est généralement aisé, le courant étant le plus souvent faible dans le lit majeur, si la digue est longitudinale. Mais une digue transversale ou oblique peut faire naître des courants importants et des remous, la disposition oblique étant particulièrement dangereuse. Il faut établir sous le canal un nombre suffisants d'aqueducs d'inondation et diriger



les eaux vers ces décharges par des épis ou diquettes, de manière à protéger la digue contre les affouillements. Selon la remarque de M. Jacquinet, ces aqueducs empêchent la formation de courants latéraux susceptibles d'entraver l'écoulement du courant sous l'ouvrage principal, par la formation d'un véritable barrage d'eau.

§ 4. Rencontre des fossés et ruisseaux.

Les petits ruisseaux et fossés peuvent être continuellement détournés, notamment par les contrefossés des digues. Ils peuvent être aussi admis dans le canal s'ils peuvent contribuer en tous temps à son alimentation. Un trop plein peut restituer une partie du débit en aval. Mais il faut tenir compte des besoins en eau des riverains d'aval, éventuellement garantis par des droits. Si tout le débit doit être conservé pour l'aval ou si le ruisseau est important, on le fait passer sous le canal par un aqueduc en conduite libre ou un siphon si l'écoulement est forcé.

Les siphons étant des ouvrages assez délicats tant au point de vue de la construction que de l'entretien, on les évitera autant que possible et on cherche éventuellement par un détournement à réaliser un aqueduc libre. On cherchera de même à réunir en un seul aqueduc le passage de divers fossés ou ruisseaux. On y fera aussi passer le débit des contre-fossés s'il n'est pas nécessaire ou possible de le conduire dans les biefs inférieurs.

Les siphons et aqueducs doivent être largement dimensionnés en vue du débit des plus grosses crues et de telle sorte qu'ils ne créent pas de remous. Cela s'obtient non seulement par des dimensions, mais aussi par des formes appropriées. D'une manière générale, il faut éviter toute discontinuité créant des remous, mais établir des transitions progressives de section, de courbure etc.

Une question importante pour l'exploitation est celle de l'envasement, des curages et de l'entretien en général.

Pour réduire les envasements, on donne la plus forte pente possible à l'ouvrage en approfondissant en aval si c'est un aqueduc.

Pour un siphon on peut établir un bassin de dépôt ou puisard qui doit être régulièrement curé et, en étiage, on réduit la section de l'ouvrage pour augmenter la vitesse d'écoulement. En temps de crue, l'écoulement se fait par la section maximum (vitesse moyenne $1 \text{ m}/''$).

Pour permettre le curage et l'entretien, on établit de préférence

les ouvrages à plusieurs tubes séparés. On munit les têtes des tubes de dispositifs permettant de les mettre à sec : vannes ou rainures pour barrages à pontrelles. C'est ce même dispositif qui permet de faire varier la section d'écoulement, en faisant débiter un, plusieurs ou tous les tubes. Le nombre des tubes dépend de la section maximum et de la longueur du siphon ou de l'aqueduc, la section de chaque tube étant d'autant plus grande que la longueur est plus grande, pour réduire les chances d'obstruction et faciliter les travaux d'entretien et l'accès des ouvriers. Donc, il ne faut pas multiplier à l'excès le nombre des tubes, ni employer des sections trop petites. Il est désirable que le passage aisé d'un homme soit toujours possible si l'ouvrage a quelque longueur ou importance.

Pour les petits tubes de faible longueur, le curage peut se faire par une chaîne munie de grattoirs que l'on agite pour délayer la vase en même temps qu'on concentre un fort débit dans le tube (chasse vitesse max. 3 m//). Ou bien on fait passer une boule d'un ϕ peu inférieur à celui du tube (comme dans les égouts). Il faut pour cela que le tube ne présente pas de coudes brusques mais des arrondis de grand rayon.

Pour les petits aqueducs libres, un tube peut être suffisant, surtout s'il permet le passage d'un homme.

Pour éviter les obstructions par corps flottants, on peut disposer une grille. Pour les siphons, on peut aussi plus simplement disposer l'ouverture suffisamment en dessous du niveau minimum des eaux; la tête étant terminée par un mur vertical contre lequel s'arrêtent les corps flottants.

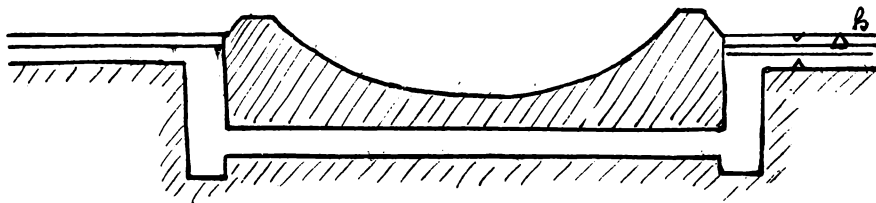
Il y a avantage à réduire la longueur de l'aqueduc proprement dit, c'est-à-dire des tubes étroits. A cet effet, on établit souvent les têtes dans les digues, la continuité du chemin de halage étant assurée par un pont.

Au point de vue du canal, la grande question est celle de l'étanchéité

Les charges de fuites créées par un aqueduc ou siphon sont multiples et importantes :

- 1) par les joints des maçonneries et terres ;
- 2) par les solutions de l'étanchement ;
- 3) à travers le plafond vers l'ouvrage ;
- 4) par suite des tassements dus à l'ouvrage.

Il faut donc assurer une bonne liaison des étanchements et des maçonneries, à recouvrements sous pressions et à joints brisés, assurer une étanchéité parfaite des tubes et une fondation inébranlable.



autant que possible, l'ouvrage ne doit pas être trop près du plafond du canal,

pour les raisons exposées ci-dessus mais aussi pour permettre les approfondissements ultérieurs et éviter les dégradations de l'ouvrage par des coups de gaffe.

La charge motrice est, d'après Weisbach :

$$\Delta h = \frac{v^2}{2g} \left(1 + \xi_0 + \xi \frac{x}{4\Omega} l \right), \text{ en m.}$$

$$\xi_0 = 0,51 \quad \xi = 0,0144 + \frac{0,01}{\sqrt{v}}$$

Pour un siphon circulaire $\frac{x}{4\Omega} = \frac{1}{d}$

Pour une section rectangulaire de dimensions a et b: $\frac{x}{4\Omega} = \frac{a+b}{2ab}$.

§ 5. Construction des siphons et aqueducs

Leur emplacement naturel est dans le thalweg du cours d'eau, c'est-à-dire fréquemment dans les mauvais terrains d'alluvions, parfois fluents. Comme la fondation doit être inébranlable, il faut y avoir intérêt à s'écarter, moyennant un détournement du cours d'eau, si l'on peut trouver un terrain favorable sans augmentation sensible des frais permanents. C'est une question de cas concret.

Si le terrain n'est pas trop mauvais et qu'à profondeur pas trop grande on trouve une assise convenable, la fondation la plus

habituelle est un radier général, qui se fait actuellement en béton. Il peut y avoir intérêt, si la fouille est profonde, à établir en dessous une couche de gravier, sable ou béton maigre. Sa grande largeur de l'ouvrage, peu chargé, permet généralement d'asseoir l'ouvrage de cette manière.

Si le terrain est mauvais sur une grande profondeur, on fonde le radier sur pieux.

Bien que ces ouvrages soient des ouvrages d'écoulement et non de retenue, il est recommandable, en terrain affouillable, de munir les têtes de parapoulies. En très mauvais terrain, on entoure l'ouvrage d'un encoffrement complet. Il est aussi de règle générale d'établir aux abords de l'ouvrage des radiers et des ferrés pour éviter les affouillements et réduire les chances d'infiltration.

Les têtes des petits ouvrages sont dans le talus extérieur. Pour soutenir les terres du talus, il y a un tympan et des murs en retour ou en aile. Les murs en retour sont employés le plus fréquemment; on les engage fortement dans le talus pour éviter les infiltrations. Les murs en ailes, plus économiques et formant entonnoir d'entrée, favorisent les infiltrations.

Pour les ouvrages importants, le mur de tête est dans la digue et s'élève jusqu'à son couronnement. Le pertuis unique dans le corps de la digue est couvert par un pont en passerelle, dont les culées font corps avec le mur de tête. Des petites piles en saillie entre les tubes permettent leur obturation séparée et l'accès aux tubes. Les entrées et sorties des tubes doivent être profilées en vue de réduire les pertes de charge.

Les tubes se font en maçonnerie, béton armé ou métal, souvent revêtu alors de béton.

Les tubes en maçonnerie se construisent à sec, avant la mise en eau du canal ou exceptionnellement pendant un long chômage, ou bien à l'abri d'un batardeau, par tronçons successifs, si le canal est en exploitation. Sa construction en tunnel est impossible à cause

des tassements. La grande difficulté est celle de l'étanchéement. Les Allemands emploient un moyen perfectionné mais coûteux : la chape de plomb de 2 à 3 mm d'épaisseur formée de feuilles soudées. Au point de vue de l'étanchéité, les maçonneries de pierres et de briques sont douteuses. Actuellement on préfère un bon béton, ayant une composition granulométrique assurant une bonne étanchéité et assez riche. Il est mis en oeuvre plastique et fortement comprimé, par exemple par des filettes pneumatiques. Il reçoit une chape de mortier de ciment

Ensuite il est recouvert d'une couche suffisante de goudron, ou d'asphalte ou de feutre asphalté. On peut économiquement remplacer les coffrages pour des tubes en béton moulés d'avance. Les sections sont rondes ou ovoïdes. Ces ouvrages sont lourds ; en terrain mauvais, il vaut mieux employer du béton armé. On peut mouler l'ouvrage sur place ; la section la plus avantageuse, s'il y a plusieurs tubes, est le carré à pans coupés, ou le cercle. On peut aussi employer des tubes moulés d'avance, légèrement armés et enrobés dans un massif de béton auquel on incorpore éventuellement des armatures de liaison. La section est généralement ronde. Ces ouvrages sont exécutés à sec à la manière ordinaire. On peut détourner provisoirement le ruisseau, mais il est plus simple et plus économique de construire l'ouvrage latéralement et de le raccorder ensuite au ruisseau. On procédera notamment de la sorte pour la reconstruction d'un ancien siphon pendant l'exploitation du canal, afin d'accélérer l'ouvrage. L'ancien siphon est bouché après coup.

Lorsque le canal est sous eau on peut construire un siphon en béton par tronçons construits à sec à l'abri de batardesaux successifs, laissant subsister une section libre suffisante dans le canal. Cette méthode est très aléatoire si le terrain est mauvais ou très perméable. Il faut des parois de palplanches très profondes, bien ancrées dans les berges. Il est prudent de protéger ces ancrages par des contre-batardesaux en terre ou entochements (voir planche). Les reprises et

fonctions de batardeaux doivent être bien étudiées. Il faut creuser les moindres fouilles possibles sous forte charge d'eau et donc, à l'intérieur du batardeau, construire le siphon par courts tronçons exécutés le plus rapidement possible. Les tuyaux moulés en béton conviennent très bien. Il faut protéger les batardeaux du choc des bateaux par une estacade de garde. Pour les épaissements, je me réfère au cours de fondations. Lorsque le terrain est très mauvais, il est préférable de recourir aux tubes métalliques, qui peuvent être mis en place sous eau. C'est leur seule raison d'emploi, car ils présentent de sensibles inconvénients, surtout l'oxydabilité. Il faut les envelopper de béton extérieurement si possible ou du moins intérieurement. On emploie de l'acier, assez dur, pour réduire la rouille. Les tubes sont formés de viroles assemblées par emboîtement ou courre-joints, avec des rivures d'étanchéité. Pour la mise en place sous eau, on drague une cunette assez profonde et on y coule une couche de béton ou simplement de gravier, arasée au niveau voulu. Le tube, monté à la rive et, dont l'étanchéité a été essayée sous pression d'eau, est amené flottant à son emplacement et immergé par introduction d'eau. Si, par faute de place, on est obligé de faire le montage définitif sur chalands, le tube est mis en place en le levant au moyen de biques fixées sur les chalands et sur la rive, puis immergé comme ci-dessus (voir planche) La descente est guidée par des chalands ou des estacades. On épuise et on procède au revêtement protecteur intérieur du tube, éventuellement au ciment-gun. La cunette du tube est comblée au moyen de béton coulé sous eau ou d'enrochements. L'achèvement et la construction des têtes se fait à sec. (Voir rap. port de M. M. Hottel et Parmentier au Congrès international de navigation du Caire - 1926) Si le canal est en remblai, il se présente une difficulté spéciale du fait qu'il faut effectuer des brèches dans les diques pour la descente du tube. Ces brèches doivent être contournées par des contre-diques très sûres et bien raccordées aux diques permanentes.

Cette méthode permet une construction rapide, économique et sûre si la manoeuvre est bien organisée, au moyen d'un matériel adéquat et, de préférence, puissant. Pour les cours d'eau larges, il faut éventuellement monter le tube sur une estacade établie en travers. On peut réserver un passage pour la navigation, fermé en fin de montage, pendant une durée minimum, au moyen d'une travée mobile. On a immergé de la sorte à Zwolle (Pays-Bas), un siphon en tuyaux de fonte assemblés par joints à rotules (voir le Génie Civil, année 1893).

Les siphons et aqueducs doivent faire l'objet d'une surveillance constante. En disposant des échelles aux deux têtes, on peut déterminer la dénivellation motrice et constater s'il y a des obstructions.

§ 6. Ouvrages accessoires des siphons et aqueducs.

Comme il a été indiqué antérieurement au chapitre de l'alimentation, les aqueducs sont souvent pourvus d'ouvrages accessoires d'écoulement, notamment :

1°) des bandes de fond, généralement à vanes cylindriques, permettant la vidange du canal ou la chasse des tubes. La vidange doit se faire à vitesse assez faible pour ne pas raviner le lit. La bande s'établit généralement dans une niche pratiquée dans la berge et contournée par les étanchements qui restent ainsi continus.

2°) des déversoirs de trop-plein ou régulateurs, généralement à pontrelles, pour permettre le réglage ou le déglacage. On peut les combiner avec les bandes de fond et établir le déversoir à pontrelles avant la bande de fond, de manière à ne pas interrompre l'étanchement. Toutefois, cette disposition ne convient pas pour le déglacage, la section de la bande étant trop petite pour l'évacuation des glaçons, qui doivent se déverser directement devant la tête.

§ 7. Pont-canaux. Généralités

Ces ponts franchissent un canal sur un cours d'eau, un étan-

= min de fer ou une route. Les caractéristiques générales de ces ouvrages sont :

- 1°) l'invariabilité des charges sollicitantes et l'absence de chocs et d'actions dynamiques. Par contre, les charges sont énormes (3.000 kg par m² pour 3 m. de tirant d'eau, sans compter le poids propre)
- 2°) la présence de l'eau, qui exige une étanchéité propre, un recouvrement étanche aux digues et des dispositifs d'isolement et de vidange ;
- 3°) les poussées latérales exercées sur les parois de la cunette, qui soumettent l'ouvrage à des actions transversales importantes, qui peuvent devenir énormes en cas de gel prolongé (expansion de la glace).

Le premier point permet l'emploi de taux de travail plus élevés pour les matériaux ; néanmoins les fortes charges exigent des constructions très solides. Un point important pour l'étanchéité est la réduction des déformations, notamment des déformations permanentes. Il faut donc des fondations considérables, en regard aux fortes charges, pour éviter les tassements.

Pour le calcul, on tiendra compte du mouillage maximum, comportant un exhaussement du plan d'eau normal d'au moins 30 cm. selon le règlement français. On envisage l'effort maximum du vent.

À l'étanchéité aussi parfaite que possible est nécessaire, moins pour éviter les pertes d'eau, toujours modérées, que pour éviter la dégradation des éléments de l'ouvrage par les suintements et infiltrations. Ce sont surtout les maçonneries qui sont délicates à ce point de vue, à cause de leur porosité. Outre l'altération progressive des matériaux et mortiers sous l'effet des filtrations, l'action du gel est partiellement à craindre. On emploiera donc, en règle générale des matériaux peu absorbants et non gélifs, mis en œuvre en maçonnerie soignée, à joints minces, ou mortier de ciment. Actuellement, on emploiera de préférence du bon béton et on ménagera des joints de retrait et de dilatation remplis d'un mastic de fibres et de bitume durcifié.

Le progrès de l'étude des matériaux spéciaux a amélioré beaucoup les moyens d'étanchement, dont les principaux sont les ciments et surtout les bitumes, en association et avec la fibre. Le goudron ne doit plus être employé pour les étanchements importants, tels que ceux de ponts-canaux. L'efficacité des étanchements dépend toutefois de l'observation de certaines règles essentielles.

Quelle que soit la ductibilité des produits employés, il convient de réduire les déformations permanentes et élastiques au minimum. Il faut protéger les chapes de l'action directe de l'air, de l'eau ainsi que des actions mécaniques violentes (frottements, coups de gaffes, etc.). Il faut donc les recouvrir de contre-chapes, de préférence en béton dur, dalles de béton, briques dures, pavés, etc., posés sur une couche mince de sable ou mieux de béton de sable, et à joints asphaltés. Le ciment-gun peut éventuellement convenir. La chape proprement dite peut se faire comme dans les ponts en maçonnerie : une couche de mortier de chaux saturée de 3 cm. et une chape double de mastic d'asphalte de 15 mm. On peut employer aussi un badigeon d'asphalte à chaud, une couche de feuilles de jute ou feutre asphalté, à joints largement recouverts et collés au bitume chaud, enfin un badigeon superficiel d'asphalte. Une pareille chape bien faite et bien protégée, est absolument étanche et durable, car elle est toujours sous pression et n'a pas à craindre de sous-pressions.

En Allemagne, pour les ponts-canaux des canaux de Dortmund à l'Embs et de l'Embs au Wüser, on a préféré une chape de plomb de 3 mm formée de feuilles soudées. Pour protéger le plomb d'altérations chimiques au contact du ciment, il est couvert sur les 2 faces de matières bitumineuses. Il y a évidemment une contrechape. Cet étanchement a donné satisfaction, mais il est très cher. On a émis des doutes sur sa durabilité. Aussi des précautions très particulières ont-elles été prises pour le protéger de tout contact susceptible d'altérer le plomb. Notamment, les métaux de natures diverses ont été soigneusement isolés, pour éviter toute action électrolytique.

Bien entendu, les chapes doivent être contenues jusqu'au dessus du niveau maximum de l'eau et être fortement serrées, par un rebour d'équerre, dans les parois latérales. Cuse culées, les chapas doivent se raccorder, à long recouvrement, avec les étanchements importants et particulièrement soignés du remblai du canal aux abords de l'ouvrage. Ces étanchements en corroi doivent largement entourer les culées, et il y a intérêt à donner à celles-ci un développement important et des formes complexes, pour allonger et briser les joints, conformément aux principes exposés à propos des étanchements.

On élargit donc le remblai aux abords du pont-canal, ce qui est favorable pour le stationnement des moyens de halage. Les talus de raccordement, et éventuellement le fond, sont perrés ou parés sur une certaine longueur.

Il est désirable, dans l'intérêt des parois latérales des cunettes de ponts-canaux aussi bien que des coques de bateaux, de garnir les parois latérales de fortes lisses de guidage en bois.

En hiver, il est nécessaire d'empêcher la formation de la glace, sauf pour les ponts en maçonnerie à tympans particulièrement massifs ou contrebutés. Des dispositifs de vidange sont ménagés, aux extrémités du pont, dans les murs d'ailes. Ce sont généralement de simples tuyaux métalliques, fermés par une vanne glissante ordinaire, commandée par vis. L'ouverture est munie d'une crépine.

L'isolement se fait par un rideau d'aiguilles prenant appui à la base sur un seuil ménagé dans la culée et, à la partie supérieure, sur une passerelle métallique amovible établie en travers du canal et s'appuyant sur les murs d'ailes. Pour les ponts-canaux à simple voie, on peut employer des rideaux de fouilles. Au canal de Dortmund et l'Enis, les ponts-canaux sont établis entre deux portes de sûreté du type décrit.

L'aspect des ponts-canaux est massif, à cause des parois latérales très élevées de la cunette. Il faut une architecture très appropriée. Les piles s'élevant jusqu'au couronnement, des arcades et

des encorbellements conviennent pour améliorer l'aspect.

§ 8. Ponts-canaux en maçonnerie.

Sont les plus anciens, dérivés des aqueducs construits dès l'Antiquité. Les plus anciens en France étaient à simple voie et de section insuffisante. Il a fallu les agrandir, opération très hasardeuse et peu satisfaisante. Les plus récents ont été construits à double voie, suivant le type perfectionné du pont de Bise-l'As-sout (M. Jacquinet).

La disposition des larges chemins de halage sur arcades, réservant des passages au piéton et petits véhicules, réalisée dans les ponts de ce type, n'est pas seulement à ce point de vue, elle assure en même temps une résistance élevée à la poussée latérale des glaces, dont on a plus à se soucier. Enfin, elle permet de réparer l'étanchéité des parois latérales et de remédier facilement à ces défauts par injection de ciment.

Les ponts allemands ont des tympans pleins massifs de 3.00 d'épaisseur, une section mouillée très large et des portées atteignant jusqu'à 21.00. On reproche généralement aux ponts-canaux en maçonnerie la susceptibilité aux effets thermiques qui se manifeste, ainsi que l'on sait (Voir cours de Ponts en maçonnerie) par des fissures à l'extrados aux naissances. Les infiltrations y sont fréquentes, malgré le soin apporté à l'étanchéement. Telle est du moins l'expérience des anciens ouvrages français. On recommande donc d'éviter les grandes portées (max. en France, 16.00) et les voûtes surbaissées en arc de cercle, et d'employer de préférence le plein cintre ou l'ellipse.

Cependant les arches de 21 m. du pont canal sur c. de Dortmund à l'Éms au dessus de la Lippe n'ont que 5 m. de flèche et sont en arc de cercle. Les étanchements au plomb semblent avoir résisté. On a tempéré en France ces opinions anciennes; on en retient d'ailleurs l'intérêt de donner à la chape une élasticité particulière aux retombées des voûtes en arc de cercle.

Il faut une assez grande hauteur disponible pour les ponts-canaux en maçonnerie. Si la hauteur est grande, une solution excellente, qui simplifie beaucoup l'ouvrage, consiste à lui donner une largeur telle que l'on conserve la cunette normale du canal avec ses étanchements (Pont canal de St Firmin près de Briare). Il faut, bien entendu, éviter tout tassement. Les ponts-canaux anglais se rapprochent de ce type, ils conservent l'étanchement d'argile de la cunette.

Dans certains petits ponts du canal de Dortmund à l'Embs, de faible portée, ce système a été maintenu par dessus la chape de plomb. Il est évidemment le meilleur pour l'étanchéité de la jonction à la rigole.

Au-dessus des voûtes, il y a généralement un remplissage massif en béton maigre. On a jamais employé d'éclissés. Cependant il existe de nombreux ponts aqueducs à éclissés transversaux apparents, l'application ne paraît pas exclue aux ponts-canaux, sauf danger de fissuration au droit des retombées. En France, les culées sont généralement sensiblement plus larges que le pont-canal à simple voie (pour les raisons exposées) et elles ont des murs en retour // disposés de manière à allonger le chemin des infiltrations. Les ponts-canaux allemands à double voie ont simplement des murs en retour courbes évasés.

Toutes les faces internes des culées sont enveloppées d'une forte couche de corroi d'étanchement, continu avec l'étanchement du canal. Eventuellement, les parements comportent de fortes chicanes horizontales. Les chapes des voûtes sont descendues fortement sous la face supérieure du corroi; les chapes des parois latérales sont prolongées dans les digues sur la longueur des murs en retour et à une profondeur suffisante dans le corroi.

§ 9. Ponts-canaux en béton armé.

Le béton armé se substituera probablement dans l'avenir tant à la

maçonnerie qu'au métal pour les ponts-canaux. Il permet de construire des ponts en voûtes (grande portée, 50 m. à Minden sur le Weiser), à dalles plates (petites portées, 7,90 sur le chemin de fer Berlin-Stettin) ou à dalles nervurées (moyennes portées).

L'étanchéité du béton armé est grande; en outre on emploie les chapes ordinaires.

Les arches du pont de Minden sont triarticulées, pour éviter les effets thermiques. La continuité de la chape au dessus des joints d'articulation est assurée par des tôles cintrées de cuivre, de 3 mm. d'épaisseur.

P. 30 Fig. 3.

Dans le pont à dalles sur le chemin de fer de Berlin-Stettin, la cuvette en béton armé est séparée par des joints des deux culées, pour éviter les fissures de retrait et de tassement. L'étanchement au plomb est prolongé sur une certaine longueur dans la couche d'argile d'étanchement du canal.

Les ponts-canaux en béton armé pourront se construire aussi d'après le type de l'aqueduc du Grand Béat (qui ne sert pas à la navigation), sur palés à arcades, suivant un système constructif caractéristique du béton armé.

§ 10 - Ponts-canaux métalliques

D'usage déjà ancien en France, les premiers furent exécutés en fonte. Le type le plus moderne est le pont canal de Briare à simple voie, dont la section a été définie antérieurement. Il a quinze travées de quarante mètres de portée; la longueur totale atteint 663 m.

Les poutres métalliques sont à âme pleine (9 mm), de 3,40 m de hauteur. L'âme sert de paroi latérale à la cuvette. Le fond en tôle est supporté directement par les entretoises espacées de 1,45 et assemblées très rigidement, par goussets arrondis, aux maîtresses poutres, pour résister aux poussées latérales qui tendent à ouvrir l'auge. Les chemins de balage sont en fonte à fause sur consoles, mais empiochent partiellement sur la cuvette. Cette disposition est

préférable à celle du pont canal de Sarcalbe, dans lequel les chemins de balage sont complètement en encorbellement. Le moment de torsion des maîtresses poutres, résultant de la poussée de l'eau, s'en trouve accru.

On a suggéré de disposer deux maîtresses poutres supplémentaires extérieures pour supporter le chemin de balage. Ces systèmes de deux poutres de part et d'autre de l'auge pourraient être solidement contreventés et réduiraient les déformations de torsion ainsi que les déformations et fatigues transversales, dues à l'action du vent, qui est très considérable à cause de la grande surface des poutres. Les poutres extérieures seraient en treillis, ce qui améliorerait l'aspect de l'ouvrage.

198 Le plus large pont-canal métallique actuel est celui construit sur la Reine (canal Ems - Weser). Il a 77 m. de longueur, ses poutres sont continues sur 4 appuis, la travée centrale mesurant 30 m. Sa cunette, de 24 m. de largeur, est portée par 14 maîtresses poutres sous voie, écartées de 1,775 m. En outre, deux poutres extrêmes, écartées de 3,312 m. des voisines, supportent les chemins de balage. La tôle du fond est rivée sur les maîtresses poutres, elle est formée de tôles cintrées recouvertes de béton d'asphalte. Les parois latérales, en tôles planes, sont arc-boutées sur les traverses en treillis réunissant les maîtresses poutres extrêmes par le moyen de bécquilles en treillis. (Voir Zeitschrift für Bauwesen 1917).

116. de 116as et des auteurs allemands préconisent, selon des conceptions de principe, l'emploi de cunettes indépendantes des maîtresses poutres, qui pourraient être en treillis, l'auge serait formée d'un lorde rivé sur des fortes membrures en U. celles-ci seraient suspendues aux maîtresses poutres. Pour permettre le support du chemin de balage et le contreventement, il y aurait deux systèmes de deux maîtresses poutres, un de part et d'autre. La suspension de l'auge devrait permettre les déformations de translation longitudinale et transversale et la torsion transversale. Elle serait réalisée par des

assemblages à toles flexibles simples ou croisées, éventuellement par des glissières ou balanciers (secteurs). Ses avantages seraient une répartition plus rationnelle du travail, une plus longue durée par suite d'une possibilité de renouvellement de l'auge, protection des maîtresses-poutres contre les avaries par abordage, etc (voir H. Engels - Der Wasserbau, tome II).

En réalité, ces considérations paraissent très théoriques. Le pont-canal de Briare n'a pas montré de défauts justifiant les dispositions précitées. Pour ce qui est de l'âme des maîtresses-poutres, on sait que ses contraintes de flexion sont faibles. On peut d'ailleurs le renforcer, l'épaisseur de 9 mm, adoptée à Briare, est faible. Sa protection est facile à réaliser au moyen de lisses et au besoin de parois à claire voie en bois. Sa protection contre la corrosion peut se faire par un enduit mince de grès ou mieux un badigeonnage d'asphalte. Enfin, deux ponts accolés à simple voie paraissent préférable à un pont à double voie, sauf en ce qui concerne la résistance à l'avancement. Mais le croisement des bateaux serait plus aisé et, en cas de résistance réellement élevée, il serait facile de desservir le pont par un moyen de traction électrique.

Le point délicat est la jonction étanche au dessus des appuis de dilatation. Actuellement, on fixe sur la culée, d'une manière étanche, un cadre en tôle dans lequel pénètre l'extrémité de l'auge. On les réunit par un dispositif flexible étanche (feuille de caoutchouc, tôle métallique cintrée flexible, etc) ou glissant dans un espace étroit à joint d'étoupe asphaltée serré par un presse-étoupe à vis. Un dispositif ancien consistait à garnir les deux toles en regard de fourreaux en bois appliqués les uns contre les autres par la pression de l'eau.

H. J.

Le dispositif du pont-canal de Briare combine les trois procédés. En ordre principal, un joint flexible en caoutchouc, protégé par une tôle glissante et suivi d'un presse étoupe. Le système a donné satisfaction et paraît, à vrai dire, surabondant. Il faut du caout.

-choue extra-souple, contenant très peu de soufre (Voie de Stas, Canaux) et attaché d'une manière spéciale pour éviter les amorces et déchirures. Ces bandes de caoutchouc sont assez aisément remplaçables. Au pont canal de Condes, un simple joint de caoutchouc recouvert d'une tôle glissante, a donné satisfaction.

§ 11. Ponts-rivières

On peut faire franchir un canal par une rivière au moyen d'un pont. Sté. de Stas cite le pont-rivière d'Oudan, sur le canal de Roanne à Sigois. Sa section est déterminée par la considération du débit à écouler. Le dispositif d'étanchement est intermédiaire entre les précédents.

§ 12. Pont-canal tournant. (P. 31).

À Bacton, on a construit un pont-canal tournant par lequel le Bridgewater-Canal franchit le canal maritime de Manchester. La cuvette forme un véritable sas de 71.67 m. de longueur, tournant sur une couronne de galets. Sa fermeture se fait par vantaux tournants simples. Le sas est rempli d'eau pendant la rotation et l'étanchéité des joints, qui sont obliques (angle de rotation du pont: 90°) est assurée par un cadre en L, à section en forme de coin, garni de boudins de caoutchouc.

- Deuxième Section -

Voies navigables naturelles.

Chapitre VII

- Rivières canalisées -

§ 1 - Dispositions des barrages éclusés -

Le moyen le plus efficace d'assurer la navigabilité des voies d'eau naturelles - est la canalisation. Elle est réalisée par des barrages éclusés retenant les eaux en amont et créant ainsi une série de biefs descendant d'amont en aval, comme dans un canal à un versant. L'étude de la canalisation au point de vue hydraulique figure au cours d'hydraulique appliquée.

Lorsque les barrages sont dressés, la navigation se fait par les écluses. Mais lorsque les hautes eaux permettent la navigation libre, elle s'effectue par les passes profondes ou navigables, qui doivent nécessairement se trouver dans le thalweg. Les autres passes, dont le seuil peut être plus élevé, portant le nom de déversoirs. Enfin, il existe en outre parfois des passes flottables peu profondes constituant un canal très incliné ; on les rencontre sur les rivières où le flottage est encore important.

Les dispositions dépendent des circonstances particulières. Les passes déversoirs occupent tout le débouché laissé par les autres. La passe flottable se trouve généralement à la rive pour une raison d'exploitation. Si l'écluse est en rivière, elle se trouve aussi à la rive, au pied de laquelle il doit y avoir une profondeur suffisante.

A cause de la proximité du barrage et du danger assez grand, pour les bateaux descendants, de se jeter sur le barrage, par suite de la difficulté de gouverner, il faut une estacade d'entrée assez longue en amont, d'une ou de préférence deux longueurs de bateaux. Il peut être avantageux, pour l'entrée des bateaux, de la construire comme estacade étanche formant glissière, comme pour les écluses de canaux. Cependant il faut craindre que cette étanchéité ne favorise l'envoûtement du chenal, surtout si l'écluse est fermée en temps de crue. A l'aval du barrage, les bateaux peuvent être gênés à la tête de l'écluse par les remous du barrage; il faut éviter en tous cas les diversoirs latéraux ou inclinés qui dirigeraient des courants en remous latéraux vers la tête aval de l'écluse.

Éventuellement, on établit aussi une estacade à l'aval. Généralement, le barrage se rattache à l'écluse entre la tête amont et le milieu du sas.

Il est fréquent que les barrages s'établissent à l'endroit d'une division du cours d'eau par une île, cette position étant souvent avantageuse au point de vue hydraulique. Elle l'est aussi au point de vue constructif, elle assure des bons chenaux naturels d'écluse, favorables pour la navigation, et l'île fournit un excellent emplacement pour la maison éclusière et les annexes du barrage, si elle n'est pas trop exposée aux submersions. Enfin la construction est facilitée car, pour la construction, on peut barrer successivement chacun des bras par des batardeaux, du moins en dehors des périodes de crue. Ces planches contiennent quelques exemples de dispositions. Le terre-plein des écluses est au-dessus du niveau des plus hautes eaux s'il n'en résulte pas un rétrécissement inadmissible de la section d'écoulement des crues et une dépense exagérée.

§ 2. Ecluses en dérivation.

Il arrive quelquefois que l'on établisse les écluses en dérivation, par exemple pour avoir des profondeurs suffisantes dans le cas de

canalisation par barrages fixes de faible chute d'une rivière à forte pente, ou bien pour raccourcir le trajet par une coupure droite si le barrage est placé dans une boucle étendue. On a en outre l'avantage de fonder l'ouvrage en terrain vierge à sec ; il faut toutefois se méfier de choisir l'emplacement dans un ancien lit comblé, dont le terrain est généralement vaseux et mauvais.

Au point de vue hydraulique, la dérivation a l'avantage de réduire moins le débouché que l'écluse en rivière ; au point de vue de la navigation, le chenal est favorable s'il n'est pas trop long, mais assez pour ne plus être influencé par le barrage à aucune de ses extrémités. Mais la construction et l'entretien de la dérivation sont très coûteux et les longs chenaux constituent, par leurs sections rétrécies, une gêne pour une navigation intense. En outre, les dérivations présentent le caractère de canaux latéraux construits dans un lit d'inondation, que nous avons étudiés généralement à propos des canaux. Si l'on veut donc protéger des envasements, il faut les border sur les deux rives par des digues construites avec les terres de la cunette et réunies à l'extrémité amont par une porte de garde dont le couronnement est au dessus du niveau des plus hautes crues. Si la dérivation se rapproche suffisamment des versants de la vallée, on peut raccorder la digue longitudinale extérieure par une digue transversale. Ces dispositions surtout la dernière, restreignent le lit majeur et créent éventuellement des culs de sac exposés aux envasements intenses.

Le terre-plein de l'écluse est au niveau du couronnement des digues. L'écluse peut tenir lieu de porte de garde à l'extrémité amont, ainsi qu'à l'extrémité aval si elle est munie d'une porte jusqu'à vers l'aval (écluses aval des dérivations de la Moselle canalisée, voir planche ...)

Si la dérivation n'est pas protégée, elle est exposée à être envasée ; les courants et remous font aussi dégrader ses berges et

les abords de l'écluse. Pour toutes ces raisons, il faut dans les grandes canalisations éviter les longues dérivations. La chute de l'écluse est plus grande que celle du barrage de la quantité correspondant à la pente superficielle, qui peut devenir assez importante si la dérivation est longue. Mais les fluctuations du niveau en amont et en aval peuvent parfois gêner la navigation dans la dérivation par la réduction de profondeur. Cette question et celle des niveaux des digues et des pressions sur les digues des longues dérivations doivent être étudiées avec attention.

Il est préférable de construire l'écluse le plus près possible de la rivière, avec de courtes dérivations de longueur strictement nécessaire pour faciliter l'entrée et la sortie des bateaux, et de section spacieuse pour leur permettre d'y stationner en attendant l'éclutage et de se croiser avec aisance. On réalise en somme artificiellement la disposition des deux bras séparés par une île ; on conserve l'avantage de fonder en terrain vierge.

Mais en général, rien ne s'oppose dans ces conditions à construire l'écluse immédiatement à la rive, à sec, en réservant un batardeau de terre ; les chenaux d'accès sont réalisés ultérieurement par élargissement du lit et bordés d'estacades. C'est le dispositif le plus simple et le plus économique. Si la dérivation est courte, le barrage se construit généralement à hauteur du milieu. Si elle est longue, l'emplacement le plus favorable dépend des circonstances mais est généralement vers l'amont, parce qu'il en résulte des profondeurs plus favorables aux extrémités de la dérivation. Mais il faut que l'extrémité amont de la dérivation ne soit pas influencée par le courant et les dépôts qui se produisent derrière le barrage. À l'extrémité aval est généralement loin des remous de la chute du déversoir.

Quant à l'écluse, elle se trouve de préférence à hauteur du barrage, pour faciliter l'exploitation des deux ouvrages par le même personnel. Pour éviter une trop grande distance entre les

deux, il faut une dérivation courte ou bien, en cas de dérivation longue, placer les ouvrages vers l'extrémité amont, mais pas trop près cependant, pour les raisons précitées. Les entrées doivent se raccorder favorablement aux thalwegs, ce qui se réalise surtout par des profondeurs suffisantes. Mais il faut prendre garde aux courants obliques, surtout pour la navigation avalante et surtout à l'extrémité amont. Le chenal doit partir du cours d'eau sous une faible inclinaison, à partir d'une rive concave mais de courbure pas trop accentuée et avoir une entrée bien évasée. Les portes de garde se trouvent aux extrémités amont et généralement dans une tête à pertuis étroit, cette disposition, propre aux longues dérivations, est donc défavorable à la navigation.

§ 3. Écluses de rivières

Dans les rivières canalisées, les chutes sont limitées par les conditions topographiques et hydrographiques. Elles sont généralement inférieures à celles des canaux. Dans les anciennes canalisations, elles étaient généralement très réduites. On tend aujourd'hui à les faire aussi grandes que possible pour allonger les biefs et faciliter la récupération d'énergie; il y a triplement avantage au point de vue de la navigation, de la construction et de l'exploitation.

Les écluses de rivière ont généralement des dimensions plus étendues que celles de canal, à cause des dimensions plus grandes des bateaux et surtout de l'importance plus considérable des trains. On cherche surtout à écluser sans rupture des trains importants. À moins que l'on ne prescrive que tous les remorqueurs soient munis d'un treuil, il est donc nécessaire de prévoir des cabestans sur les bajoyers, et des poulies de renvoi pour les cables. Il est important aussi de faciliter la sortie des bateaux par le remorqueur; il faut donc des aides assez grandes.

Lorsque la chute est faible, il arrive que l'on ne construit pas de mur de chute; les portes amont et aval sont alors identiques.

Cette disposition assez ancienne est abandonnée aujourd'hui pour les hautes chutes.

On voit souvent en rivière des écluses accolées, une grande pour trains de bateaux, une petite pour bateaux isolés. Cette disposition résulte souvent du doublement d'une ancienne écluse devenue insuffisante. Pour une construction neuve, il semble préférable de prévoir une écluse avec portes intermédiaires.

Les estacades peuvent être à claire voie, en bois ou béton armé, ou même formées seulement d'une succession de dues d'Osibe, construits dans les mêmes matériaux. Les estacades étanches peuvent être en bois, béton armé (charpente supportant une paroi étanche) ou encore des murs en maçonnerie.

§ 4. Portes de garde

Les portes de garde, placées parfois aux extrémités amont des dérives, sont constituées comme une tête amont d'écluse. Le bouchage est généralement assuré par des portes busquées, mais les portes à segments conviennent très bien pour ce genre d'ouvrages, d'autant plus qu'elles peuvent être réversibles. Il arrive en effet qu'en cas de vidange du lief supérieur, on admette les bateaux en refuge dans la dérivation, qui doit être fermée vers l'amont avec une retenue d'eau vers l'extérieur. Il faut alors deux portes busquées opposées, ou une porte de garde réversible. Il faut observer cependant que cet usage des dérives comme refuge est peu favorable, parce qu'il expose la navigation à être interrompue si un bateau gare s'échoue et qu'il exige une étanchéité suffisante de la dérivation, parfois un étanchement, qui est exposé aux sous-pressions en temps de crue et est donc très précaire. L'écluse en aval d'une dérivation peut comporter une porte de garde vers l'aval.

§ 5. Récupération de l'énergie hydraulique.

Les fortes chutes permettent de capter dans les rivières canalisées,

à cause des forts débits, des puissances considérables. Un barrage moderne doit donc s'accompagner d'une usine hydroélectrique, qui fonctionnera avantageusement en parallèle avec un groupe conjugué de centrales à forces motrices diverses. On substitue à une passe de versoir, au voisinage d'une rive, généralement opposée à l'écluse, une usine hydroélectrique et ses annexes. Il faut évidemment étudier soigneusement la question des débouchés en crue et celle du réglage des débits et des niveaux. Il faut utiliser des organes de bouchure facilement réglables et très étanches; les vannes Stoney et les vannes à segments conviennent bien. Je renvoie pour plus de détails au cours d'exploitation hydraulique (Hydraulique Industrielle), mais je signale l'utilité, dans le voisinage immédiat de l'usine, d'une passe profonde destinée à l'éclusement des dépôts de sables et graviers, qui tendent à se former derrière les grilles des prises d'eau des turbines, et qui sont dirigés vers cette passe par un seuil saillant oblique.

Si la chute est faible, il y a intérêt au moins à produire l'énergie électrique nécessaire pour l'exploitation de l'écluse, force motrice et éclairage. Une petite usine de l'espèce peut s'établir aisément dans une pile.

§ 6. Passes de flottage.

Les passes de flottage constituent en somme une réminiscence des anciennes écluses sans sas de la navigation par laches ou une anticipation sur les écluses à long sas et à navigation continue. Elles comportent un canal dont le mouillage sur le seuil d'entrée est calculé en vue d'une profondeur uniforme d'eau d'environ 0,60 m. en moyenne. La section est généralement rectangulaire et d'une dizaine de mètres de largeur, en vue de permettre le passage de radeaux de largeur ordinaire. Le canal est d'ordinaire entièrement maçonné et revêtu en pierres dures pour éviter les dégradations par les chocs des pièces de bois et les fortes vitesses de l'eau. La nature la plus appropriée en amont est la vanne levante ou à sautoir ou à cylindre, ou la hausse à tambour. En aval, il n'y

à pas de fermeture permanente. Des rainures à poutrelles permettent de constituer un batardeau pour les travaux éventuels dans la passe. La pente est élevée ; pour réduire les vitesses, on peut disposer le fond en gradins, ce qui est peu efficace, ou plutôt employer des dispositifs en saillie sur le fond et les parements en vue d'augmenter le coefficient de rugosité. Ces dispositifs sont très efficaces et consistent en bossages en saillie, parfois des chevrons ou des seuils saillants sur le fond ; enfin des radcaux noyés à chanière, du système décrit pour l'amortissement de l'énergie des nappes d'écoulement des déversoirs. Ces derniers dispositifs ont été appliqués à des ouvrages récents en Bohême et sont disposés à l'extrémité aval. En eaux basses et moyennes, ils empêchent la formation d'un ressaut par l'eau à grande vitesse et constituent aussi un matelas élastique pour les radcaux qui tendent à plonger à la sortie. À l'extrémité aval de la passe est suivie d'un chenal évasé bordé d'une digue afin d'éviter les remous transversaux à la sortie. Dans ces conditions, la pente d'ailleurs variable et réduite aux extrémités peut atteindre jusqu'à 2 % max.

§ 7. Échelles à poissons

Les échelles à poissons constituent de petits canaux très étroits, dans lesquels l'eau doit avoir des vitesses ou des chutes assez faibles pour permettre la remontée des poissons ; d'autre part la pente doit être assez forte pour ne pas que l'ouvrage ait un encombrement ou un prise élevée. On emploie des petits canaux terrassés et parés en maçonnerie présentant des cascades ou chicanes ; placés normalement au barrage ou parfois en pente oblique sur le parement amont d'un barrage fixe. Un système économique, peu encombrant et basé sur un ingénieux principe hydraulique est celui des échelles seuil, qui comportent un canal assez étroit, confectionné de préférence en béton et dont les parois sont garnies d'arbages. (Voir Hydraulique appliquée).

§ 8. Chemins de halage -

Le halage est un moyen de traction moins approprié en rivière qu'en canal, à cause du courant et de la distance variable du chenal aux rives. Le dernier point n'est sensible en rivière canalisée qu'immediatement à l'aval des barrages. Les chemins de halage doivent satisfaire aux mêmes conditions que pour les canaux. Par suite des fluctuations entre l'étiage et les plus hautes eaux navigables, il peut être utile d'établir deux chemins de halage à des niveaux différents, dont l'inférieur peut être submergé en hautes eaux.

Le changement de rive de halage, qui est toujours un inconvénient, l'est d'avantage en rivière à cause de la plus grande largeur et du courant. Il en résulte qu'il faut donc autant que possible placer toutes les écluses à la même rive, ce qui peut être difficile par suite de profondeurs insuffisantes. À la rive opposée au halage, on réserve généralement un chemin de faible largeur (3.00) pour permettre les manoeuvres. Une autre difficulté provient de la rencontre des affluents importants, le halage doit nécessairement s'effectuer sur la rive opposée et éventuellement changer de rive. Les petits affluents sont franchis par un ponceau. Au passage sous les ponts, il faut autant que possible faire passer le chemin de halage sous le pont, en tous cas si le halage est possible sous le pont, c'est-à-dire si l'arche usinière est à la rive de halage dans le cas d'un pont à plusieurs arches ou si le pont est à arche unique. Sinon, il faut nécessairement détacher le cable et reprendre le bateau après le pont. Il faut alors prévoir des bornes et anneaux d'amarrage aux abords du pont, pour aider aux manoeuvres éventuelles.

Chapitre VIII

Travaux dans les rivières à courant libre

§ 1. Matériaux et modes de construction des ouvrages en rivière.

Les ouvrages en rivière ont pour but de défendre le lit contre les actions destructives, principalement du courant et souvent de contribuer en même temps à la navigabilité. Les dispositions de ces ouvrages au point de vue hydraulique sont exposées dans le cours d'hydraulique appliquée. Au point de vue de leur construction, ils doivent satisfaire aux conditions exposées à propos des canaux, mais aggravées fortement en rivière par suite du courant, de la fluctuation des niveaux et de l'action violente des crues.

Les ouvrages, souvent de faible importance technique propre, en acquièrent au point de vue économique par leur grande étendue ou quantité, et leur entretien peut être coûteux pour la même raison. La question n'est donc pas dénuée d'importance pour l'ingénieur praticien, qui y consacrera avec profit ses connaissances générales de stabilité de massifs continus et d'hydraulique, ainsi que les résultats de son expérience.

D'une manière générale, il faut éviter les réactions importantes du courant d'eau, qui sapent inévitablement l'ouvrage. Il faut donc adopter les ouvrages aux cours d'eau en altérant le moins possible leur caractère. Si les ouvrages doivent constituer une correction avérée, il faut alors au moins les conditionner d'une manière qui soit compatible avec des dispositions fluviales naturelles. Il faut notamment éviter les discontinuités quelconques et toujours préférer des variations progressives et des allures continues. Pour éviter l'action locale d'érosion ou d'affouillement des courants d'eau,

il faut assurer une forte stabilité statique et chimique et, pour les éléments peu résistants, la réduction des vitesses par le principe de filtration.

Les matériaux employés sont principalement les terres, les pierres sèches ou enrochements et les fascines.

Pour les ouvrages étanches, les terres qui conviennent le mieux sont le courroi sablo-argileux ou le remblayage hydraulique sablo-argileux ; dont les propriétés ont été définies dans d'autres parties du cours. Pour les terrassements ordinaires, le sable pur ou peu argileux, mais assez gros semble au contraire préférable ; un certain étauchement superficiel peut être obtenu par colmatage, avec des sables fins argileux.

Pour les enrochements, il faut employer les pierres les plus dures et les plus denses possibles, de préférence anguleuses et de formes et dimensions assez variées pour assurer un enchevêtrement aussi bon que possible. Le volume doit être d'autant plus grand que les actions auxquelles la pierre peut être soumise sont plus fortes, donc notamment en surface. Mais comme les pierres de grandes dimensions réservent entre elles des vides importants où l'eau peut développer des vitesses importantes, si des affouillements sous-jacents sont à craindre, il faut alors interposer un filtre. En surface, les litages sont rangés à la main et ancrés dans la masse par des parpaings.

Les fascines constituent des matériaux très spéciaux aux travaux hydrauliques et y conviennent très bien en mauvais terrain, donc dans les alluvions limoneuses des cours d'eau et plaines basses et les estuaires maritimes

On emploie :

a) les clayonnages, formés de brossage de branchages flexibles (bois vert) appelés clayons de 3.50 m. de longueur, entrelacés sur des piquets battus en files verticales. Les piquets ont 0,04 à 0,06 de diamètre, 1,00 à 1,80 de longueur selon les besoins et sont espacés de 0,30 à 0,35 cm. dans les lignes.

Les clayonnages bas, de 0,15 de hauteur, servent à retenir les revêtements superficiels de terre arable ou gazon : on les dispose en files parallèles à des distances variables selon les besoins, ou bien en losanges.

Pour le revêtement de talus très bas assez raides, on emploie des claires de plus grande hauteur ancrées dans l'intérieur du talus.

b) les fascines sont des bottes ou fagots de branchages verts d'environ 2.00 de longueur, serrés par de forts liens métalliques ou bords en chanvre goudronné. Le fourtour entre les liens est de 0,45 à 0,50 ; les liens sont espacés de 0,60 et le premier est à 0,25 m. du gros bout. Les fascines lestées sont bourrées de pierres ; elles sont éventuellement plus fortes et le nombre de liens varie selon les besoins. Les fascines lestées sont destinées à être immergées et à rester en place par leur propre poids. Les saucissons sont de très longues fascines continues, liées tous les 0,25 m. et qui peuvent être aussi lestées. Les fascines ordinaires se fixent au sol par des lignes de fiquets clayonnés, appelés tunages. Il y a généralement au moins deux tunages espacés de 0.50 en moyenne. Les fascines peuvent être posées jointivement en simple couche en guise de revêtement. Les fascinaiges de soutènement sont composés de couches superposées de fascines jointives posées normalement au parement, le gros bout apparent. Les rangs successifs sont légèrement en retrait et fixés les uns aux autres par des tunages, les vides entre les couches sont remplis de gazons ou de terre fortement damée. Les lignes ou bordures de fascinage sont formées de files de fascines fixées au sol par des fiquets et éventuellement tunées. Les bouts minces doivent recouvrir les gros bouts. Parfois les branchages sont enchevêtrés de manière à former de longs boudins continus. Les lignes de fascinage servent généralement de soutènement de pied de revêtements superficiels.

c) les plateformes de fascinage sont formées de couches superposées de fascines jointives croisées alternativement par couches et comprises entre deux quadrillages inférieur et supérieur de saucissons. Les couches sont réunies par des bords en chanvre goudronné

ou métalliques, ainsi que par des biquets et des clayonnages, de manière à assurer une parfaite solidarité. Ces plateformes sont construites à la rive; leurs dimensions variables peuvent atteindre jusqu'à 30 m. de longueur, 20 m. de largeur et 2 m. d'épaisseur. On les amène à leur emplacement par flottage au moyen de nacelles et on les échoue en les lestant de pierres cassées, de gravier, d'argile etc... Pour les ouvrages attachés aux rives, on les construit aussi parfois de la rive de telle sorte que les claires s'avancent dans l'eau au fur et à mesure de leur confection, en flottant. On constitue généralement une double couche de fascines, que l'on immerge ensuite en lestant. On procède ensuite de même pour les plateformes suivantes, dont les dimensions sont, à l'aide d'une épure simple, établies de telle sorte que les claires successives se recouvrent suivant les talus déterminés d'avance.

Les fascinaiges, comme en général les ouvrages en bois, se conservent bien lorsqu'ils sont constamment immergés et que l'eau ne contient pas de matières ou d'organismes destructeurs du bois.

La maçonnerie et le béton s'emploient également. Les parements tantôt émergents, tantôt immergés sont exposés à des dégradations superficielles surtout par l'action du gel. Il faut donc dans ce cas éviter la porosité du béton et employer des mélanges compactés très fortement comprimés (de préférence savatés)

§ 2. Revêtements de rives.

Les revêtements doivent empêcher les dégradations superficielles des berges et les éboulements; ils doivent résister à l'action érodante de l'eau courante, au frottement et au choc des corps flottants ou entraînés ainsi qu'aux actions provenant de la navigation; choc de gaffes, frottement des câbles etc. Il faut donc employer des matériaux capables de résister à ces actions dans les conditions où elles se présentent. Les qualités exigées sont d'ailleurs modérées car, dans la plupart des rivières navigables, des talus gazonnés, de faible

inclinaison et concaves, suffisent généralement. Les revêtements périssent moins par destruction des matériaux qui les constituent que par attaque du support : excavation sous le revêtement et déchaussement du pied. Il y a donc avantage à avoir des revêtements déformables, à moins de les rendre inaffouillables, ce qui est très coûteux. Les revêtements des cours d'eau naturels ne peuvent être étanches, à cause des nappes souterraines et pour éviter les sous-pressions. Dans ces conditions, il est toujours utile d'interposer un filtre entre le revêtement et le talus, tout au moins derrière les rides (drains dans un parement maçonné au mortier.) D'autre part, le pied doit être fondé profondément, à l'abri des affouillements.

Il est à remarquer qu'un talus immergé, s'il est soumis à l'action érosive de l'eau, qui s'arrête d'ailleurs lorsque le profil d'équilibre est atteint, est par contre stabilisé par la pression de l'eau. C'est en somme à la ligne d'eau et au dessus que l'usure est la plus considérable. Par suite de la fluctuation de la ligne d'eau, les revêtements doivent donc s'étendre d'un niveau inférieur à l'étiage jusqu'aux hautes eaux ordinaires. Dans une rivière canalisée, le niveau de la flottaison normale des biefs est le plus exposé. Cependant, les rives pour lesquelles un profil d'équilibre est impossible, par exemple les rives concaves, doivent être protégées depuis le fond du lit jusqu'au dessus des hautes eaux et l'affouillement au pied doit être empêché par des dispositifs de fixation du lit.

Le système le plus simple de construction et d'entretien, et le plus économique dans les régions où les pierres sont abondantes, consiste dans les enrochements tout venant ou calibrés répandus depuis le fond jusqu'au niveau voulu. Le pied est donc recouvert pour éviter les affouillements. Le revêtement se construit et s'entretient sous eau.

Pour économiser les matériaux, qui sont d'ailleurs alors plus coûteux, on peut construire des parements maçonnés à sec ou au mortier au

moyen de litages et fascinaings plus ou moins uniformes. Mais ils doivent se construire et s'entretenir à sec, ou bien seulement au-dessus de l'étiage et exigent une fondation sûre, en enrochements, fascinaings, pilots etc... Les perrés maçonnés au mortier sont rigides et exposés à la rupture s'ils sont saisis par l'eau.

Les clayonnages, fascinaings de recouvrement ou de soutènement et les plateformes de fascinaing lestées sont d'un emploi avantageux en association avec les semis, gazonnements et enrochements dans les terrains médiocres ou mauvais et dans les régions pauvres en pierres. Ces revêtements sont souples, s'adaptent au terrain et peuvent se construire et s'entretenir sous eau, par l'emploi des fascinaings immergés.

Les palplanches en bois et béton, les revêtements en plaques ou dalles de béton ou en cadres de béton armé remplis de maçonnerie sont perfectionnés et durables, mais coûteux et exposés aux accidents s'ils ne sont pas très soigneusement implantés et ancrés. On a employé en Belgique des revêtements en rideaux de briques perforées, assemblées par des fils de fer assurant la solidarité de l'ensemble en lui conservant de la souplesse. (Système Villa...). En règle générale, les revêtements les plus souples sont les meilleurs.

§ 3. Digues insubmersibles.

Ces digues doivent être étanches et se construisent comme les digues de canaux, totalement ou partiellement en corroi ou par remblayage hydraulique. Il faut veiller à bon ancrage dans le sol et assurer une protection efficace du côté du lit par des revêtements et des soutènements appropriés. Les talus concaves et à faible pente moyenne sont recommandables. Il est bon de protéger le pied mouillé par des massifs d'enrochement ou des fascinaings. En mauvais terrain, la digue peut être assise sur des plateformes de fascinaing lestées d'argile; parfois même toute la partie inférieure peut être formée de plateformes superposées lourdes d'argile damée en vue de l'étanchéité. On peut aussi cons-

stituer des digues d'encrochement étanchés par du corroi ou de l'argile sur la face mouillée.

§ 4. Digues submersibles.

Les digues submersibles étanchés doivent satisfaire aux mêmes conditions et être protégées sur les deux faces et au couronnement, notamment à cause du déversement des eaux au dessus de la digue. Les digues sont dans des conditions très défavorables et d'ailleurs peu employées.

Les digues basses destinées à la correction des cours d'eau et la formation de nouvelles rives peuvent être perméables. On les construit en pierres sèches, terre ou fascines. Dans le cas d'emploi de pierres, il y a généralement un noyau tout venant et un revêtement calibré et posé à la main. Les digues en terre sont, de même, protégées par des pierres ou fascinages de revêtement ou par des files jointives de saucissons. Les digues peuvent être constituées complètement de plateformes lestées ou de gros boudins lestés, superposés par rangées et retenus par des pieux en files longitudinales.

§ 5. Épis et seuils de fond.

Les épis sont construits comme les digues submersibles, mais en partant des rives; ils peuvent être construits à sec en grande partie en période d'étiage, notamment s'ils sont en fascinages.

La tête est exposée fortement aux affouillements, il faut donc une protection efficace du fond aux environs par encrochements ou grandes plateformes lestées de fascinage. Ces précautions peuvent être restreintes si, selon les tendances les plus communes actuellement, les épis se terminent en seuils plongeants à pente très douce.

Les seuils de fond sont souvent construits dans le prolongement d'épis et se raccordent à des digues basses. Ils sont construits dans les mêmes matériaux: saucissons ou plateformes lestées ou enco-

chements. On se sert de pontons ou de nacelles spéciales pour l'immersion en vue d'assurer le maximum d'exactitude et d'éviter l'éparpillement des matériaux. A ce point de vue, le meilleur résultat pour les enrochements est obtenu par des bennes ou trémisses d'immersion.

Derrière les digues basses, on dispose souvent des ouvrages transversaux de colmatage. Ces ouvrages peuvent être assez sommaires; ils doivent simplement créer des discontinuités. Ce sont des parois de clayonnage, des huissons, des fascines dressées, des levées ou tas de pierres, de terre etc.

§ 6. Murs de quai

Les murs de quai se construisent dans la traversée des villes et dans les ports. S'ils ont pour but de mettre les agglomérations à l'abri des inondations, ils sont élevés et il est utile de les couronner par des parapets étanches. Souvent ils sont divisés en murs hauts et bas séparés par un chemin de balage, un quai de bordement etc. Le mur bas est submersible.

Ces murs s'établissent en tenant compte du poids propre, de la poussée des terres, de la poussée de l'eau et éventuellement des charges circulant sur le terre plein et qui affectent la stabilité du mur. Dans la fondation, il faut tenir compte des pressions éventuelles, mais il faut éviter les pressions d'eau derrière le mur et à cet effet les munir de drains, notamment au-dessus de l'étiage dans les cours d'eau naturels, afin de permettre, lors de la décrue, l'écoulement des eaux qui se sont amassées derrière le mur pendant la crue. Cependant, comme cet écoulement n'est pas instantané, il est prudent de vérifier la stabilité du mur en supposant la pression maximum possible d'eau derrière le mur. Toutefois, les murs destinés à mettre à l'abri des inondations doivent être tout à fait étanches. Après une crue, les eaux d'infiltration en provenant d'une submersion éventuelle doivent s'écouler par les égouts ou par infiltration.

Elles peuvent donc rester en pression derrière le mur pendant un certain temps. Ces murs s'exécutent souvent en béton. Le revêtement en moëllons donne un aspect généralement plus avantageux que le béton et peut être employé pour cette raison, malgré les inconvénients connus des massifs hétérogènes.

Ces murs ne se distinguent en somme des murs de soutènement ordinaires que par la fondation sous le niveau de l'eau. (Voir cours de terrassements - 2^e partie). En bon terrain rocheux inaffouillable, on a recours à la fondation directe, assurée contre les glissements par une surface de fondation inclinée. On les construit à l'abri de batardaux. On peut les construire en maçonnerie ou béton armé, éventuellement les ancrer selon les dispositifs courants pour les murs de soutènement. Les éperons conviennent particulièrement pour ces murs.

Par bons terrains de toute nature, on peut constituer le mur par des caissons jointifs en béton, amenés à leur emplacement par flottage et descendus, par lestage de béton peu riche, sur une plateforme bien arasée en enrochements ou en fascinaiges lestés. Cette base doit être inaffouillable.

Pour des murs secondaires, industriels ou provisoires, on peut établir des parois de palplanches jointives en bois, en acier ou en béton armé, ancrées dans le terrain.

En mauvais terrain affouillable, on peut avoir recours à la fondation par coulage de béton sous eau entre des parois étanches de palplanches soutenues par des pieux raccourcis au niveau de l'étiage. L'emploi de l'air comprimé est exceptionnel à cause des dimensions faibles et du prix élevé. Le système le plus adéquat est celui de la plateforme en béton supportée par des pieux de support en bois ou béton armés battus à la sonnette. Sur cette plateforme, établie aux environs de l'étiage ou de la flottaison normale, on construit le mur. Sous la plateforme, les terres se disposent librement et sont parfois couvertes d'enrochements diversés derrière la plateforme. Pour réduire la poussée des terres sur

le talus inférieur et le pilotage et stabiliser le mur, il est avantageux de prolonger la plateforme en arrière du mur dans les terres ; ce procédé est surtout recommandable en terrain vaseux. Le pilotage comporte aussi généralement des rangées de pieux obliques s'opposant à la flexion. On peut également descendre par dragage des puits jointifs ou peu distants, que l'on recouvre d'une plateforme ou d'un mur après les avoir remplis de béton coulé sous eau.

Chapitre IX

Entretien et exploitation des voies navigables.

§ 1. Entretien des voies d'eau.

Il consiste dans la réparation des dégradations normales aux ouvrages hydrauliques et aux ouvrages d'art, le maintien du mouillage du cours d'eau et de la viabilité du chemin de balage ainsi que du bon état de fonctionnement des dispositifs mécaniques éventuels. En outre, la réparation des dégradations exceptionnelles, le relèvement des épaves etc. Les dégradations étant progressives, il y a intérêt à éviter leur extension par un entretien continu. Il y a avantage à employer des procédés de construction n'exigeant pas de mur à sec : enrochements, fascines lestées, terres. Il faut un certain matériel qui dépend de l'importance de la voie d'eau, mais qui comporte nécessairement quelques embarcations, nacelles ou chalands pour le transport du personnel et des matériaux. Il y a grand intérêt à réduire les frais de transport par l'emploi de moyens mécaniques, et, en tous cas d'éviter le balage par hommes. Le meilleur système est celui des embarcations automotrices indépendantes. Les grandes voies d'eau, telles que le Rhin etc, possèdent des dragues, des embarcations de sondage, de dérochement par percussion ou minage,

des bateaux avec cloche à plongeur, etc. Il faut toujours disposer au moins de scaphandres.

Les draguages sont nécessaires dans les cours d'eau naturels navigables, après les crues, dans les fosses ayant une tendance à s'ensabler, notamment dans les chemins d'écluses des rivières canalisées.

Les dégradations aux berges et aux chemins de halage se produisent aussi surtout pendant les crues : affouillements, éboulements, dépôts de sable et gravier encombrant le chemin de halage, ailleurs déchaussements et affouillements du chemin de halage par les eaux.

Pour la visite et la réparation des ouvrages toujours immergés, on effectue ce que l'on appelle des chômages d'entretien des canaux et rivières canalisées, c'est-à-dire que les biefs sont vidés. Ces chômages sont très défavorables pour la navigation. Pour en réduire les inconvénients, on les effectue périodiquement à des intervalles assez longs et généralement par entente dans le cas de voies internationales. Ils durent normalement, selon l'importance, de quinze à trente jours. Des accidents : ruptures de digues etc, peuvent occasionner des chômages exceptionnels importants.

Les administrations publiques se préoccupent beaucoup de réduire ou de supprimer ces chômages dans la mesure du possible. Les meilleurs moyens d'y arriver semblent l'emploi des matériaux précités : enrochements et fascine, la substitution générale du béton compact aux maçonneries à joints ; la substitution du béton armé au bois ; la suppression des organes mécaniques fixes sous eau ; l'emploi d'un matériel approprié : pontons-ques, cloches à plongeur, scaphandres etc ; la construction de batardeaux partiels amovibles etc.

§ 2. Exploitation des voies navigables.

Les voies d'eau navigables sont généralement la propriété de l'État, qui les construit, les entretient et les administre. Cette propriété est généralement, comme celle des routes, onéreuse. Une réaction contre ces principes financiers contestables se dessine. Elle ne peut aboutir à une solution raisonnable que par une coordination de tous les

moyens de transport ; dans laquelle les voies d'eau ont certainement un rôle à jouer. Il y en a évidemment de secondaires, qui, faute de trafic, seront toujours onéreuses, mais il en est ainsi des chemins de fer et des routes. Les voies existantes doivent d'ailleurs être nécessairement maintenues. La construction de voies nouvelles doit être envisagée sous un autre angle. C'est ainsi qu'il s'est créé en Allemagne des sociétés pour la canalisation de cours d'eau importants et la construction de grands canaux de jonction. On en revient donc à l'exploitation industrielle, qui avait présidé à la conception des premiers canaux anglais, au début du siècle dernier. Certains de ces canaux subsistent d'ailleurs encore en Angleterre. Un élément nouveau et important de prospérité réside dans l'exploitation des forces hydrauliques. La capacité de tonnage de la navigation est modérée par suite de l'imperfection technique. Le perfectionnement du matériel et des méthodes concurremment avec le perfectionnement des voies d'eau est susceptible d'accroître la capacité de tonnage de la navigation, pour contribuer aux charges financières de l'entreprise.

La navigation est généralement libre. Elle se fait presque tous les jours de jour ; la voie d'eau n'est pas éclairée. Il y a cependant intérêt à éclairer les écluses et barrages, notamment en vue des manoeuvres urgentes de nuit, en rivière. Cet éclairage coûte peu si l'énergie est produite par les chutes. Sur certains canaux maritimes ou canaux importants, la voie d'eau comporte un éclairage établi sur les rives et les ouvrages d'art.

La traction est le plus souvent libre, sauf s'il y a un monopole. Dans ce dernier cas, la traction mécanique peut être imposée (voie encombrée, passe dangereuse) ou facultative. La liberté est quasi indispensable par suite des aléas de la navigation et des habitudes professionnelles des marins indépendants. Elle constitue cependant un important obstacle à la navigation, car l'irrégularité de marche et la différence des vitesses gêne beaucoup le trafic.

Le perfectionnement du matériel et des moyens de traction, le développement des flottes industrielles ou mercantiles, possédant leurs remorqueurs ou automoteurs, la tendance vers une organisation plus industrielle et le mouvement fédératif des marins semblent devoir changer progressivement cette conception défavorable.

En canal, en rivière canalisée et même en rivière navigable non canalisée, il n'est généralement pas nécessaire de baliser le chenal. Lorsque cependant les passes sont très mobiles ou dans les passages dangereux (rapides etc), il est bon de baliser par des bouées, ainsi qu'au voisinage des ouvrages d'art, passages d'eau etc. Des signaux fixes ou mobiles, à la rive, peuvent régler l'approche des ouvrages d'art. Il existe généralement pour chaque voie d'eau un règlement particulier qui contient les prescriptions de sécurité. Éventuellement, dans les passages difficiles, les bateaux prennent des pilotes ou avancent en sondant. Les risques de transport sont généralement couverts par les assurances. Le contrat de transport est établi selon les lois, d'après les indications du jaugeage officiel. Outre ce jaugeage officiel, il existe encore parfois une immatriculation, qui a trait à la définition de la propriété du bateau et à l'inscription des hypothèques qui grevent éventuellement cette propriété.

Un des points les plus défavorables à la navigation résulte des obstacles dus à l'entretien, aux crues, aux vents violents et à la glace. Sauf pour les crues, on peut chercher à réduire ces causes. Notamment pour éviter la formation de la glace, on établit dans les canaux des courants de déglacage; en rivière canalisée, on multiplie les ouvertures. On combat la formation de la glace et des embâcles par des brise-glaces, par explosions etc.

§ 3. Ports

Les ports sont des installations organisées pour le chargement, le déchargement et le transbordement des marchandises transportées par les bateaux, éventuellement aussi leur entreposage. Ils comportent nécessairement :

- 1°) des possibilités de stationnement à la rive, donc des profondeurs suffisantes et des quais,
- 2°) des possibilités de manutention, donc des appareils appropriés; grues, portiques etc.
- 3°) des possibilités d'apport et d'évacuation des marchandises, donc des raccordements avec les routes et surtout avec les voies ferrées.
- 4°) des possibilités de dépôt, donc des hangars ou plus souvent des terrains de stockage, vu la nature générale des produits transportés. Les trois premiers éléments sont essentiels pour constituer un port digne de ce nom; un simple quai, accessible par la voie ordinaire et sans aucun engin de manutention, constitue bien un quai de déchargement, mais ne mérite pas le nom de port. S'il n'y a pas de stockage adéquat et puissant, un raccordement ferré largement conçu sont indispensables au succès d'un port.

Les ports particuliers, industriels ou commerciaux sont généralement de peu d'étendue quai ou appontement en rivière, avec engins de manutention et de transport; parfois des transporteurs, le plus souvent des voies ferrées desservant le quai ou le terrain de stockage en arrière. Pour les grains, les pétroles etc, on construit des silos et des tanks que l'on remplit ou vide par des élévateurs ou pompes et des trémines ou conduites. Des usines importantes établissent parfois des ports particuliers comportant des bassins ou darses.

Les ports publics sont généralement administrés ou exploités par les municipalités ou des chambres de commerce ou des syndicats d'intérêt public, parfois par des compagnies de chemin de fer. Les quais en arrière sont évidemment économiques, mais ils gênent la navigation par le stationnement des bateaux en grand nombre. Ils n'assurent aucune protection aux bateaux en cas de crues, embâcles etc. Ils laissent peu d'espace pour les voies ferrées et les terrains de stockage, qui sont exposés aux inondations. Enfin, il y a des difficultés pour l'exploitation des voies ferrées à quai, de trop grande longueur. Les ports importants se construisent généralement à proximité des villes,

dans la traversée desquelles le lit est généralement assez resserré. Les ports doivent s'établir donc aux confins des villes et ont l'inconvénient de prolonger le resserrement du lit ; il est en général préférable de les établir en amont pour cette raison.

Lorsque les voies ferrées à quai sont de grande longueur, il faut les doubler, parfois les tripler et garder toujours une voie libre pour la circulation. Les voies parallèles doivent donc être raccordées par de nombreuses bretelles. Les quies tournantes doivent avoir un grand rayon d'action. Les pontiques font gagner de la place.

Pour un port de quelque importance, la construction de bassins ou darses est la meilleure disposition. Le système le plus moderne consiste à établir un bassin de circulation et de stationnement, par exemple dans une boucle ou un ancien bras du fleuve et de branches sur ce canal d'accès des petits bassins ou darses en dents de scie, de manière à multiplier la longueur de quais par rapport aux surfaces d'eau. La circulation ne doit pas gêner le stationnement et vice-versa. Le bassin doit donc être assez large et, pour permettre le virage, il faut disposer à son extrémité un bassin de virage. L'exploitation des voies ferrées, disposées en épis courts, qui se réunissent sur des voies de circulation et des faisceaux de formation de trains, est aisée et à grand débit.

Les engins de manutention peuvent être des grues tournantes mobiles. Pour la disposition aisée des voies ferrées, les darses ne sont généralement situées que d'un côté du canal de circulation et obliquement pour faciliter l'entrée et la sortie des bateaux. Pour éviter l'ensablement du bassin et faciliter l'entrée des bateaux, l'origine du canal est généralement vers l'aval ; les darses sont donc aussi inclinées vers l'aval. Le port étant à proximité de la rivière, il est protégé contre les crues par des digues, qui doivent réserver un lit majeur suffisant. Néanmoins, il est recommandable d'établir les ports en amont des villes. Le bassin principal doit être relié par embranchements avec toutes les voies d'eau (canaux) qui se rencontrent

à proximité du port. Un carrefour de voies d'eau est toujours un emplacement favorable pour un port.

Le port sert de refuge en temps de crues, d'embâcles etc. On n'établit généralement pas de porte de garde, car l'entrée serait considérablement rétrécie dans ces conditions. Il faut tenir compte du fait que, même lorsque le port communique librement avec le fleuve, à cause de la pente du fleuve, il y a infiltration d'eau du fleuve vers le port à son extrémité amont. Ce fait est d'ailleurs avantageuse pour le renouvellement de l'eau dans le port, dont il faut éviter la stagnation et qu'il est même bon de rafraîchir par un filet d'eau de débit suffisant, mais assez faible pour ne pas créer de courant. On peut le prélever éventuellement sur le fleuve, en amont, par une rigole ou un aqueduc à vanne de réglage. Hors des crues, il résulte presque toujours de la formation d'un tourbillon à la jonction du courant rapide du fleuve et de la zone d'eau morte du port la formation d'un tourbillon local et d'un ensablement, comme dans les affluents à faible vitesse. Il faut donc entretenir les profondeurs à l'entrée.

Tous ces principes sont caractéristiquement appliqués dans les projets d'extension des ports de Strasbourg et de Cologne en cours de construction. Ces projets sont établis selon les meilleurs principes déduits de l'expérience des grands ports étrangers. On cherche aussi, à Strasbourg à accroître le rendement des quais, par leur utilisation en profondeur. La première zone de 30 m. est réservée aux hangars, souvent à étages multiples avec des élévateurs puissants. Les terrains de stockage s'étendent sur 100 m. de profondeur et peuvent déborder derrière les hangars. Les terrains industriels peuvent s'étendre encore plus en arrière et déborder sur les précipités. Les darses se construisent successivement, au fur et à mesure des besoins, mais selon un plan primitif. Il faut toujours réserver des possibilités d'extension.

Devant les hangars, les quais avec murs sont presque indispensables.

Devant les terrains de stockage et industriels, des ferrés peuvent suffire, les grues ou portiques prennent éventuellement appui sur des estacades hautes ou basses. Les grues sont presque toujours électriques; la vapeur a cependant l'avantage de l'indépendance des pannes et des grèves, mais est moins économique. Sa puissance moyenne est de 3 à 5 t. Des emplacements spéciaux sont réservés à des grues publiques ou particulières de plus fort tonnage et à des biques fixes ou flottantes de très grande charge. Les biques flottantes ont de très grands avantages, notamment pour le relèvement d'épaves etc. Les entreprises particulières ont intérêt à établir des appareils de manutention spécialisés à grand débit: treuils, culbuteurs etc.

La longueur maximum du bassin est de 2 à 3 Km.; les darses ont de 500 à 1000 m. et une largeur de 5 à 10 fois celle des bateaux. La profondeur des darses dépasse de 0,50 m. en moyenne le tirant d'eau maximum. Avec une voie unique, les grues sont écartées de 80 à 100 m., correspondant à 300 tonnes de chargement continu par jour. La distance peut être réduite, s'il y a trois voies et des dispositifs d'accélération de débit de la voie ferrée: bretelles, transbordeurs etc.

Les ports à darses parallèles greffées sur un bassin conviennent surtout pour les installations importantes dont il faut réserver largement les possibilités d'extension. Pour des installations d'importance limitée, une disposition souvent plus économique et adaptée aux terrains disponibles est celle des darses en fourchette, rayonnant autour d'un petit bassin commun d'accès à la voie navigable. Les voies de quai se réunissent facilement au faisceau à l'extrémité des bassins opposés à l'entrée, avec un moindre développement total. Les bassins peuvent d'ailleurs aussi être creusés successivement.

Chapitre I

Dragages - Dérochements sous eau -

§ 1. Généralités ~

On appelle dragage l'enlèvement de déblais sous eau quand ils se présentent en boues, vases, sables ou graviers ; l'enlèvement de roches compactes s'appelle dérochement.

Les dragages, s'effectuant sous eau, ne sont pas visibles, les profils et cubes sont toujours approximatifs. On les mesure par cubatures, qui exigent des relevés de profils par sondages. Un contrôle est obtenu par le volume des déblais évacués, mesuré approximativement dans les chalands de transport, ou bien par le volume des remblais constitués. Un plan de dragages doit précéder l'exécution des travaux. Il comporte un profil en long et des profils en travers, parfois un plan avec courbes de niveau.

Les dragages se font généralement par des moyens économiques, le dragage à main ne convient que pour des buts spéciaux : curage de fossés et petits cours d'eau, chenaux étroits ou parties d'ouvrages hydrauliques inaccessibles aux dragues mécaniques.

Le caractère particulier des dragages comme procédé de terrassement provient évidemment de l'abondance de l'eau ; il présente de multiples aspects. L'inaccessibilité directe des endroits de fouille constitue en soi une sujétion, mais dans une mesure très variable avec la nature des produits ; elle est très importante surtout pour les dérochements. Par contre, pour les terres proprement dites, c'est-à-dire divisées en grains, depuis les sables les plus fins jusqu'aux graviers et boullis et celles, qui comme les argiles, sont susceptibles de se délayer en bouillie, l'abondance de l'eau facilite la fouille et

le transport, par la destruction de la cohésion et la réduction du frottement interne. Aussi, pour certaines natures de terres bouillantes ou vaseuses, dont la fouille par les moyens ordinaires, "à sec" si l'on peut dire, est très pénible, cherche-t-on dans certains travaux hydrauliques, à procéder aussitôt que possible par dragage. Dans cet ordre d'idées, il faut citer aussi l'abatage à l'eau sous pression, que l'on effectue dans certains cas particuliers : carrières de gravier ou de sable, reprises de schlammes, de minerais etc. Cette méthode très particulière s'emploie surtout dans des exploitations minières et dans les cas où l'eau joue un rôle dans les opérations ultérieures : lavage, transport, classement etc. Dans les chantiers de construction, l'application n'est pas exclue, mais paraît devoir être plutôt occasionnelle. Citons le réglage des talus des berges par jets d'eau sous pression, courant en Amérique. C'est donc à titre de simple indication et surtout pour montrer l'action de l'eau dans la facilité de fouille que nous citons cette méthode, qui n'a que de lointains rapports avec les dragages proprement dits.

Lorsque les produits de dragage sont du sable et du gravier, ils sont à vrai dire lavés, c'est-à-dire débarrassés en majeure partie de particules terreuses, argiles etc ; cette observation ne s'applique bien entendu qu'à des bancs importants, après enlèvement des vases superficielles éventuelles et quand les déversements riviérains (égouts des villes, eaux résiduelles d'industries) ne sont pas de nature et d'abondance telle qu'il en résulte une altération sensible des produits. Les sables et graviers de rivière sont appréciés dans la confection des bétons et mortiers pour leur propreté.

Enfin les terres très pulvérulentes se transportent facilement par entraînement dans une grande quantité d'eau, dans des gouttières, couloirs ou conduites, par la gravité ou par refoulement. Il faut que la vitesse soit suffisante pour éviter les dépôts et obstructions, la limite dépend de la nature des terres. Si l'écoulement est naturel, la pente doit être forte, ce qui limite les distances de transport. Par le pompage, les transports peuvent s'effectuer à grande

istance. Il faut des pompes spéciales, dites pompes à sable, offrant partout de larges sections au passage des boues pompées et n'ayant pas d'organes délicats, tels que des soupapes, clapets etc. On emploie donc les pompes centrifuges à couronne unique et les pompes à piston plongeur, ainsi que les pompes à diaphragme pour les petites installations.

Enfin, on a proposé des pompes analogues aux pulsomètres, agissant par condensation de vapeur vive au contact de l'eau (aspiration) suivie d'admission de vapeur vive (refoulement). Le pompage se fait par choc, l'usage est grand. Les formes d'exécution sont spéciales, l'emploi de ces appareils n'est pas courant.

Les pompes sont toujours placées à peu de hauteur au dessus du niveau de l'eau, sinon en dessous; la hauteur d'aspiration est toujours faible. Les clapets, qui sont surtout nécessaires pour permettre le refoulement, sont robustes et de grand modèle; on les fait à charnières ou à boulets.

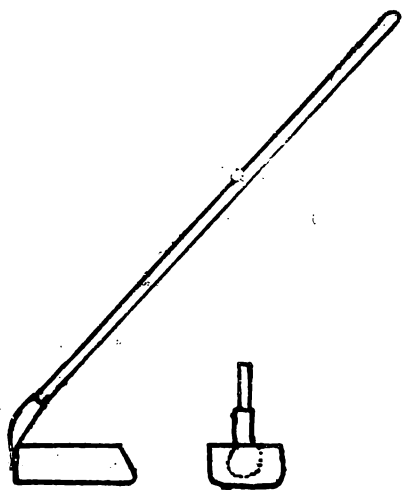
On voit que, par leur nature, ces pompes sont toutes à basse pression. Les hauteurs de refoulement seront donc limitées, d'autant plus que la densité du liquide est élevée. Par le fait même, les longueurs de refoulement sont limitées, d'autant plus que les vitesses doivent être grandes et que les frottements contre les parois des conduites et les pertes de charge sont élevées. Éventuellement, il faut monter sur la conduite plusieurs pompes en série. L'usage des conduites est rapide, surtout dans les coudes. On a proposé de renforcer les coudes par enrobage dans un massif de béton plus ou moins armé ou fretté. À moins que ce dispositif ne soit utile pour la stabilité de la conduite, il peut être plus simple de remplacer les coudes usés. Comme généralement ces conduites ne sont pas prévues pour un service permanent d'exploitation, on leur donne les épaisseurs ordinaires correspondant à leur ϕ et à la pression. Pour les conduites flottantes, la légèreté est un avantage apprécié; une solution moderne consiste dans l'emploi de

tubes en acier.

Les eaux boueuses sont déversées sur les étendues à remblayer et s'y décantent. Les terres entraînées se déposent, l'eau s'écoule par ruissellement, infiltration ou débordement du bassin de dépôt. Les terres, se déposant dans l'eau, prennent dès le début un bon tassement, que la pression de l'eau, sejourant pendant quelque temps au-dessus du remblai, perfectionne encore éventuellement. Lorsque ce remblai est bien asséché, il peut être d'excellente qualité s'il est composé de sable de grain assez gros, quartzeux ou peu argileux, sans vases ni matières organiques et, par conséquent, tels que des effets défavorables dus aux eaux ne sont pas à craindre ultérieurement.

§ 2. Dragues à main ou à action intermittente.

La drague à sac consiste en un sac de jute fixé à un anneau en fer forgé monté sur une perche; elle est manoeuvrée par un ou deux hommes. Le sac est enfoncé dans la vase et retiré rempli, l'eau s'écoule à travers le tissu. Cet appareil rudimentaire convient pour les curages locaux.



On emploie aussi la drague à main, sorte de récipient en tôle, en forme de cuillère parallélepipedique, montée sur une perche

oblique et qui agit en raclant sur le fond. Même usage que ci-dessus.

Le même récipient, de plus grande capacité et manoeuvré à l'aide d'un câble ou d'une chaîne, constitue une drague à câble (drag-line), plus ou moins perfectionnée.

Pour les petits fossés, canaux, mares, chenaux d'écluse etc on peut se contenter d'une drague d'une centaine de litres que l'on fait traîner sur le fond au moyen de câbles ou chaînes et d'un ou deux treuils à main.

Les drag. lignes américaines s'emploient à sec comme sous eau. Ses types mobiles sont constitués par une grue qui supporte l'excavateur, qui est traîné sur le sol par un câble mû par un treuil. Lorsque le câble est tendu, l'excavateur est en position de travail. Le mou du câble provoque son basculement et la vidange. L'appareil peut travailler latéralement et de front, et sur ponton dans tous les sens.

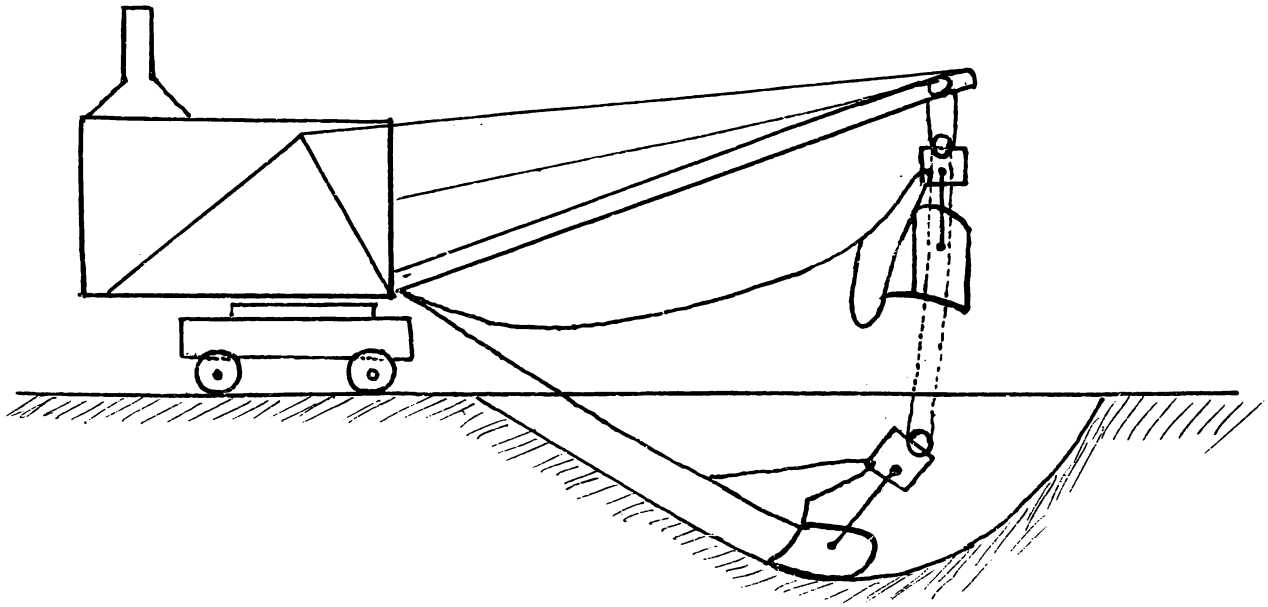
On construit de grandes drag. lignes semi-fixes avec grues à câbles. Ces grands appareils ne conviennent pas fréquemment pour les voies navigables européennes ; parce qu'ils se prêtent mal aux profils habituels ; ils peuvent convenir cependant pour la construction de digues dans le lit mineur etc.

La capacité des excavateurs américains mobiles varie de $\frac{1}{2}$ à 7,5 m³. Le nombre d'opérations atteint 30 par heure pour les grosses unités, jusqu'au double pour les petites. (2 CV par m³/h) On en a construit en Allemagne de cette capacité, qui sont montées sur chaudières et pèsent 650 t. La vitesse de travail est 1 m/'' , celle de transport est 8 m/''.

Les dragues à grappins dérivent aussi d'appareils à main. Le dispositif est le même que pour les terrassements ordinaires, la grue toutefois est généralement montée sur un ponton. Le rendement est très faible avec des vases ou terres très fluides ; le système convient mieux pour le gravier ou les débris de roches ; les bennes sont alors à claire-voie ou perforées pour permettre l'écoulement de l'eau. Les rendements sont du même ordre que pour les terrassements ordinaires. Ces appareils conviennent pour des buts spéciaux, notamment pour draguer immédiatement au pied d'ouvrages, murs, portes d'amarrage, etc.

Citons pour mémoire également les dragues à pelles, basées sur le même principe que les excavateurs à pelles. Il en existe de petites dimensions, à pelle latérale ou médiane, montées sur un ou deux petits pontons ou nacelles et mues par de petits treuils à vapeur. Elles ne peuvent travailler qu'à faible profondeur (< 7 m), ont un faible rendement et ne conviennent que pour des buts spéciaux, ana-

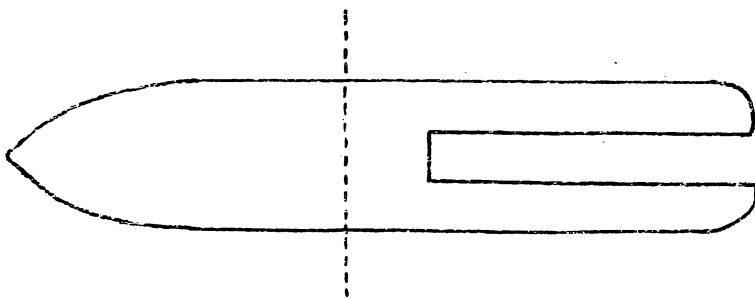
analogues à ceux des dragues à grappins, qui sont cependant supérieures, car la grue peut toujours être utilisée, même lorsque l'on ne drague pas.



Les Américains ont construit des types puissants de dragues à pelles, pour l'entretien de leurs grands ports, fleuves et canaux maritimes, pouvant draguer jusqu'à 15 m. de profondeur et dont les cuillères ont jusqu'à 10 m³ de capacité et plus. Elles conviennent pour les travaux très durs, notamment pour approfondir, élargir ou avancer dans un sol vierge (Canal de Panama).

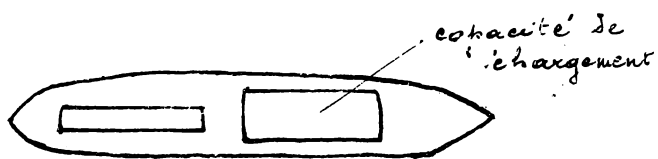
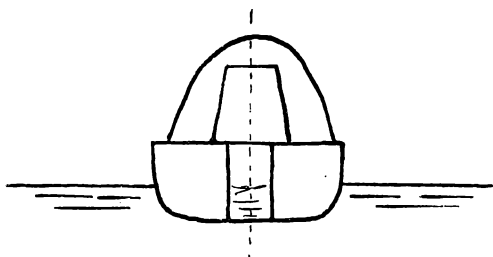
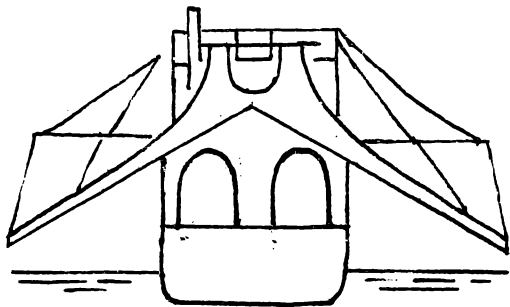
§ 3. Dragues à godets à cylindre.

Analogues aux excavateurs à godets pour les terrassements, mais montés sur pontons. Conviennent pour toutes les natures de terre, de préférence pour les sables et graviers, ainsi que les terres cohérentes.



Le ponton est ouvert dans la partie centrale, de manière à livrer passage à l'axe de la chaîne à godets, qui pivote autour d'un

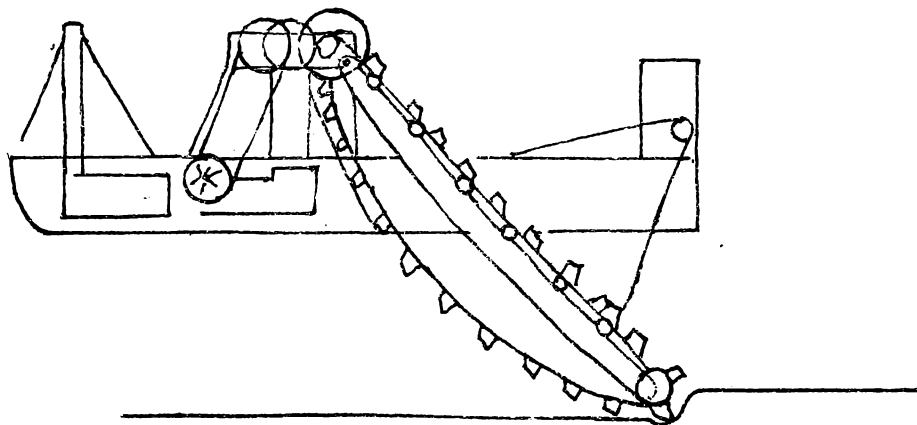
axe horizontal placé au dessus du pont, au voisinage du tambour d'entraînement. La prise de la drague est fermée ou ouverte, cette



derrière disposition convient aux dragues fluviales et permet plus facilement les dragages à faible profondeur. Elle permet aussi de draguer en avançant vers le sol vierge. Sa disposition fermée, qui augmente la solidité de la coque,

convient aux dragues marines auto-propulsives. Ses dragues peuvent draguer jusqu'à 12 à 16 m. de profondeur, exceptionnellement à 20 m. Les petites variations de profondeur se rattrapent par l'inclinaison de l'écluse, les grandes par son allongement et l'allongement de la chaîne.

La chaîne est toujours flottante, elle roule sur l'écluse par le moyen de galets. Les godets pleins remontent par le dessus, les godets



sont donc fermés, ce qui est nécessaire, même pour les faibles inclinaisons d'écluse, à cause de la fluidité des produits. Pour les terres pulvérulentes et fluides, les

godets sont à parois pleines ; pour le gravier et le sable gros ils sont perforés, pour permettre l'écoulement de l'eau et des terres fines.

Les godets ont normalement de 50 à 650 litres, et, exceptionnellement, ont jusqu'à 1000 litres. Les bords coupants sont renforcés, d'après la cohésion des terres. Pour le gros gravier, on emploie des godets à claire-voie, semblables à des corbeilles. Pour les grosses

pièces, les godets ont une forme de pelle. L'élinde pivote autour de l'axe du tambour (inconvenient des fréquentes réparations de cet axe), ou de la poulie d'entraînement (l'axe du tambour est alors fixé sur l'élinde), ou autour d'un axe indépendant porté par le bâti de support, au voisinage de l'axe du tambour. Ses premières dispositions ne conviennent que pour les petites dragues. Pour les très grandes, l'axe est souvent plus bas et la suspension est réglable; la chaîne à godets est moins tendue et prend une certaine élasticité. L'inclinaison normale est 40 à 45° sur l'horizon, elle descend jusqu'à 30° pour réduire les effets des chocs, lorsque les raques sont à craindre.

L'élinde est faite de deux poutres métalliques, le plus souvent à âme pleine et en treillis à la partie supérieure dans les grands types. Ces deux longerons doivent être solidement entretoisés et ils prennent appui latéralement sur des glissières du bâti d'élinde. Vers le bas de l'élinde s'attache le câble de suspension et de réglage d'inclinaison, manoeuvré par un treuil.

Les axes des tambours d'entraînement (supérieur) et de renvoi (inférieur) sont souvent réglables dans les coulisses, afin d'assurer la tension appropriée de la chaîne pour que les godets coupent bien, ne flottent pas trop et se vidant bien, à moins que la suspension de l'élinde ne soit réglable.

Le bâti de support de l'élinde et des engrenages et poulies est en tôles pleines dans les petits appareils, en treillis dans les grands. La commande est généralement à vapeur et par poulies et courroies, elle procure une certaine élasticité, nécessaire pour le cas où les godets rencontrent des corps durs : boue, blocs de pierre etc. Plus récemment, l'attaque se fait par moteur électrique et engrenages avec embrayage à friction. Les godets versent leurs produits dans une trémie, d'où ils passent dans une goulotte, qui peut être longitudinale, à l'arrière du bateau, ou latérale, indifféremment à droite ou à gauche. Cette dernière disposition est presque exclusive;

il y a deux goulottes, dont ordinairement une en service. Inclinaison moyenne : 35° , elle faut atteindre 45° et descendre à 20° pour les boues très fluides.

Enfin la drague comporte de nombreux treuils, pour l'élinde, les goulottes et pour les mouvements de déplacement dont il est question plus loin.

La machinerie comporte généralement une machine à vapeur avec chaudières et condenseur par surface. L'attaque de la chaîne à godets se fait par courroies. Les treuils sont actionnés par arbres et pignons placés sous le pont, ou bien par des moteurs individuels ou de groupes. Plus récemment, la machine à vapeur actionne une génératrice électrique et tous les engins sont attaqués directement par moteurs électriques.

Le rendement d'ensemble est mauvais, à cause du poids élevé de la chaîne à godets et des frottements considérables dus aux jeux et aux boues qui recouvrent toutes les parties mécaniques. Il ne dépasse guère 0,30 et peut descendre à 10% dans la vase très fluide. La vitesse de la chaîne est en moyenne $0,3 \text{ m}''$, le nombre de godets rodés de 10 à 20 par', le remplissage des godets atteignant 80 à 60% (max. dans le sable, moins dans le gravier et surtout dans la vase). Le frottement est de 3 à 15%.

Les rendements sont de

{	6 à 10 m^3/h pour les fossés (godets 20 l., comm. man. ou mécan.)
	10 à 50 m^3/h pour les petits cours d'eau
	50 à 100 m^3/h " " moyens cours d'eau
	100 à 300 m^3/h pour les grands fleuves, estuaires, petites dragues de côtes.
> 300 jusque 1000 m^3/h pour les dragues marines.	

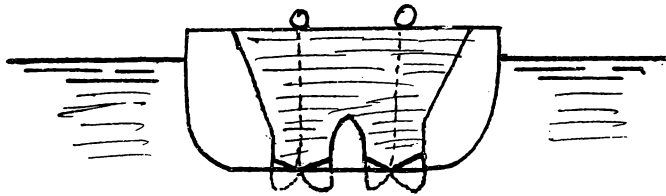
Par suite du mauvais rendement, la puissance varie peu avec la profondeur de coupe et avec la nature du terrain, dont les poids spécifiques atteignent :

1200 à 1400 kg/m^3 pour les vases fluides.

1400 à 1800 " " vases compactes.

1700 à 1800 pour le sable d'alluvion,
 1800 à 2000 " " " compact,
 2000 à 2200 " l'argile compacte.

On peut admettre en moyenne 0,4 à 0,6 CV par m³/h, ou 1,7 à 2,5 m³/h par CV indiqué pour la chaîne à godets ; la puissance totale est d'environ 0,8 à 1 CV par m³/h, en tenant compte de toutes les machines accessoires, quand le bateau n'est pas automoteur. Le prix du m³ dragué varie énormément d'après



l'utilisation annuelle, par exemple de 0,40 fr or pour 100 jours d'utilisation annuel. Le à 0,15 fr or pour 300 jours, en moyenne 0,25 à

0,30 fr. or pour des dragages importants en terres moyennes.

Les déblais sont généralement évacués dans des chaland, cependant les dragues marines sont généralement porteuses et auto-propulsives. À l'avant du navire se trouve une capacité pour recueillir les produits de dragage, qui sont vidés en mer par ouverture de clapets de fond.

§ 4. Dragues à suction.

Conviennent pour les terres peu cohérentes, car elles n'ont pas par elles-mêmes de faculté de dériser le terrain ; donc pour la boue, sable fin, gravier. Elles s'emploient peu dans les cours d'eau intérieurs, parce qu'elles ne permettent pas de faire des profonds réguliers. Elles s'emploient surtout dans les ports, bassins, embouchures, rades, parce qu'elles gênent peu la navigation. Elles sont généralement porteuses et auto-propulsives. Elles comportent donc essentiellement une coque, contenant les soutes à déblais fermées par clapets, la machine pour la pompe et l'hélice et le tube d'aspiration (ou plusieurs.)

Les pompes à piston sont peu employées, on les rencontre dans

quelques dragues isolées destinées à aspirer des vases très fines.

Le type le plus courant comporte des pompes centrifuges, qui ont l'avantage d'une aspiration uniforme et d'une grande section de passage, sans rétrécissements et sans clapets. avec une vitesse appropriée, des gros sables et graviers peuvent être aspirés avec l'eau. Les pompes sont soumises à une forte usure, surtout les palettes des roues et les parois intérieures. Ces éléments sont le plus souvent rapportés, de manière à pouvoir être remplacés facilement. Les roues sont sans parois latérales et ne comportent qu'un petit nombre de pales ou aubes. Le rendement est donc médiocre. Il existe des pompes spéciales, à aubes cloisonnées entre deux parois; on injecte de l'eau pure sous pression entre la roue et les parois du corps de la pompe pour éviter l'introduction des sables et corps étrangers. Ces dispositifs sont plus simples et préférables.

Le tube d'aspiration est en tôle ou acier, il se termine par une crépine pour éviter l'introduction des corps volumineux et porte éventuellement des dispositifs spéciaux: couteaux fixes ou mobiles, couronne à injection d'eau sous pression etc, destinés à ameublir et diviser les terrains très cohérents. Le tube est incliné, pour réduire les effets des chocs sur le fond dûs aux lames; il est articulé à genouillère sur le tube d'aspiration fixe du navire et pend généralement sur un bord du navire, plus rarement dans un fruit à ana:logue à celui des dragues à godets. Les tubes sont parfois placés symétriquement par paires à chaque bord dans les très grandes dragues (Drague "Eviathan de la "New Jersey Dock's authority").

Dans les grandes dragues américaines du type Babel, les tubes sont disposés les uns à côté des autres à l'arrière, suspendus à des chèbres ad-hoc et manoeuvrés par treuils. Un tube peut porter plusieurs têtes d'aspiration; celles-ci ont une forme très particulière, attaquent le sol verticalement et sont munies de cylindres rotatifs à couteaux. Un grand nombre de têtes (6 à 8) sont placées en ligne les unes à côté des autres, de manière à draguer

une cuvette large.

Les produits de dragage sont déversés dans les soutes destinées à les recevoir ; les boues se déposent, l'eau en excès s'écoule par des susbord. La capacité correspond généralement à une heure de dragage ininterrompu. Certaines dragues ont des dispositifs permettant de déverser à volonté dans les capacités propres ou dans des chalands ou de refouler vers la rive dans des conduites. Les soutes à boue sont toujours à clapets ; le déversement se fait par le fond. La manœuvre s'opère par treuils et chaînes ou par vérins hydrauliques. Comme les boues du fond se tassent parfois ou se collent aux parois l'évacuation est facilitée, dans les grosses unités, par des injections d'eau sous pression.

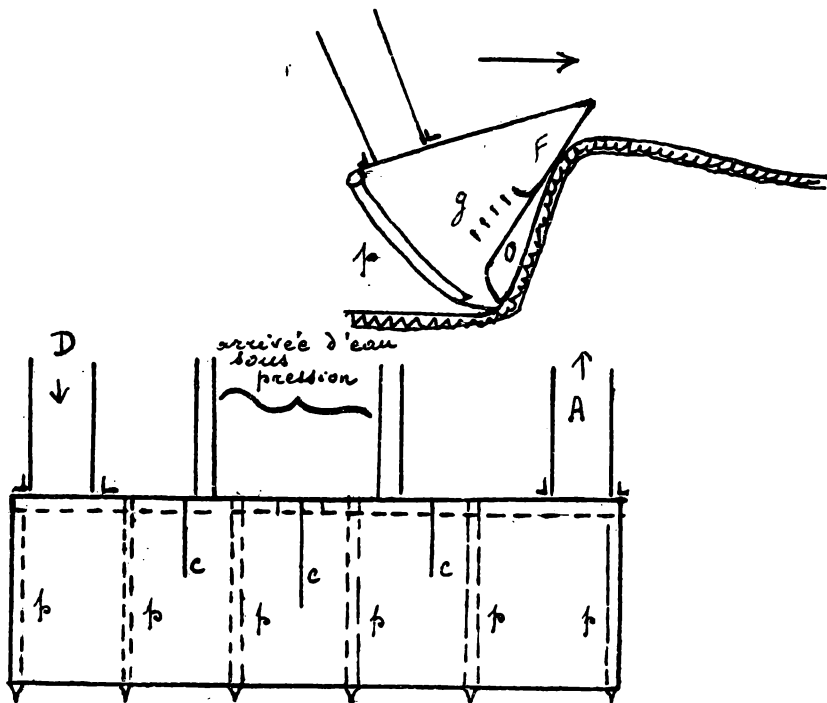
Ces dragues sont généralement à vapeur avec chaudières, condensés à surface et machine à vapeur marine, actionnant les pompes et les hélices. Parfois il y a des machines spéciales pour les deux buts. Les pompes et les hélices étant attaquées directement, la transmission électrique est peu employée et la vitesse des machines à vapeur est mieux en rapport avec celle des pompes (120 à 180 t/').

Les dragues marines comportent des installations de logement etc.

Dans les vases et terres divisées, le tube d'aspiration travaille en traînant. Dans les terres dures, le tube est incliné dans le sens de l'avancement ; la tête munie des dispositifs spéciaux précités agit sur le sol. Comme toutefois le tube est trop faible pour supporter des efforts appréciables, il est parfois placé dans une pièce en charpente métallique qui supporte les efforts et est placé à l'arrière du bateau ou dans un puits de drague. Le même dispositif se rencontre dans le système Fröbling, assez particulier pour mériter d'être cité, d'autant plus que les rendements sont élevés.

Le pan de charpente porte vers le bas une tête en forme de large godet de drague et à arête coupante, qui pénètre dans le sol. Pour désagréger les sols durs, de l'eau sous pression est injectée par les

conduites ϕ sous le couteau. Des terres pénétrant dans la tête à tra-
vers le grillage g de la partie inférieure ouverte O , la partie



supérieure F est fer-
mée et, s'appuyant
contre le sol, forme
occlusion. A l'une
extrémité de la tête
de bouche la condui-
te d'aspiration A ,
reliée à la pompe.
A l'autre extrémité op-
posée, une conduite
 D se branche, qui
se termine à peu de
distance sous le ni-

veau de l'eau. Cette eau est donc aspirée, de laie les terres qui
pénètrent dans la tête et est aspirée en A ; des parois transversales
les c contraignent le courant et favorisent le mélange. Sa quan-
tité d'eau de mélange est réglée pour obtenir la dilution la plus
favorable.

Alors que le rendement des dragues à godets varie dans des li-
mites étroites (moyenne = 0,60 maximum), celui des sucuses
peut varier dans des limites de près de zéro au maximum. Il n'est
donc pas indiqué de les prévoir pour un usage universel, mais
bien au contraire pour un genre de travail bien défini, toujours
le même. Ces dragues sont donc construites pour des buts détermi-
nés et donnent alors généralement des rendements satisfaisants en
travail normal.

La dilution des terres est grande, généralement le mélange ne
contient pas plus de 20 % de solide, le poids spécifique moyen est
de 1200 (sable).

	proportion solide.
Sable dur et gravier	3 %
Sable dur argileux	9 %
Sable fin et vase	26 %
Sable rude d'alluvion	38 %
Sable fin d'alluvion	40 %.

Le poids spécifique du mélange ne peut donc guère dépasser 1400 Kg, c'est-à-dire celui des vases légères.

Le rendement mécanique des pompes et machines est voisin de 0,3 à 0,40, il en résulte que le rendement total dans la vase est voisin de 8%, voisin de celui des dragues à godets dans les mêmes conditions. La puissance est aussi de 0,5 à 1 CV par m³/h.

Les dragues Frühling ont cependant obtenu dans le sable et la vase jusqu'à 7 m³/h par CV (avec jusqu'à 60 et 75% de solide dans le mélange pour les vases très fines; 30 à 60% pour les sables, poids spécifique moyen 1300 Kg/m³). Il existe des dragues mixtes à godets et à suction. Le prix du m³ est très variable et peut descendre au dessous de 0,10 fr or pour les dragages très importants.

§ 5 - Exécution des dragages.

Les dragues à action intermittente sont généralement montées sur des pontons de dimensions restreintes et draguent sur de très faibles étendues, en des endroits très précis, le plus souvent à proximité d'ouvrages.

Les dispositifs d'amarrage et de déplacement dépendent des circonstances locales et ne présentent rien de particulier.

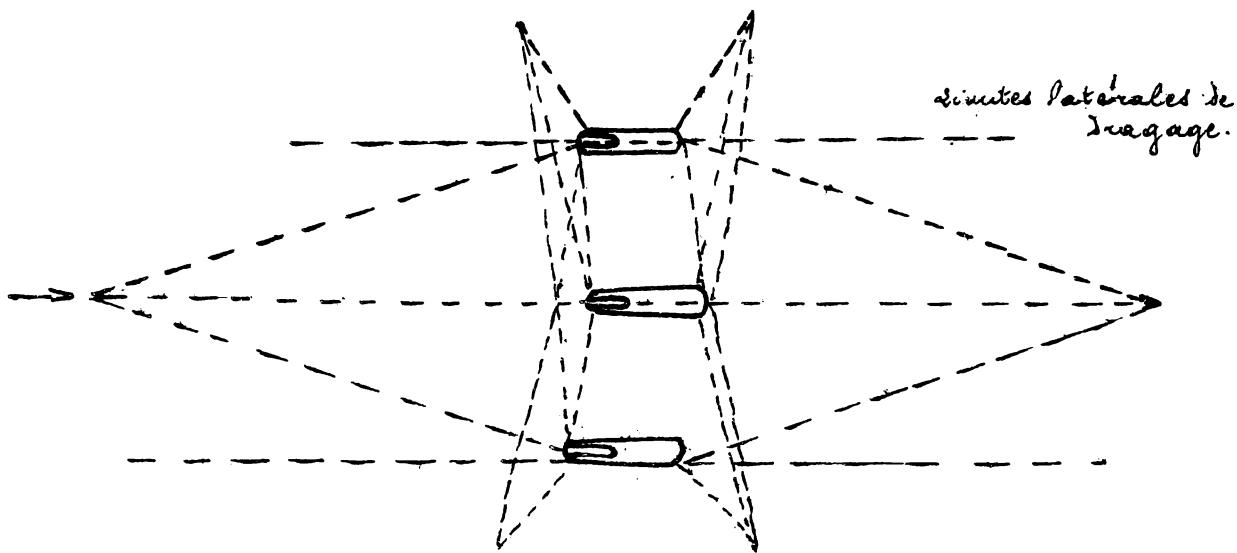
Les dragues successives peuvent balayer de grandes surfaces, mais procèdent par trous, elles ne peuvent faire des profils réguliers, à moins d'être munies de dispositifs spéciaux, tels que les systèmes Frühling, Bates etc. Elles travaillent généralement en traînant c'est-à-dire en avançant lentement, le tube d'aspiration traînant derrière. Il n'est pas indispensable d'ancrer s'il n'y a pas de courant. En mer ou lors que la drague travaille en "labourant" dans un sol ferme, elle

est fixée à deux ancrés, une à l'avant l'autre au bord opposé au tube, disposés de manière que le bateau soit sous le vent et sous le courant. Cette disposition est nécessaire pour protéger les tubes latéraux contre les effets de dérive.

Ces dragues précédentes ont comme avantages d'exiger peu d'amarrage et donc de gêner peu la navigation.

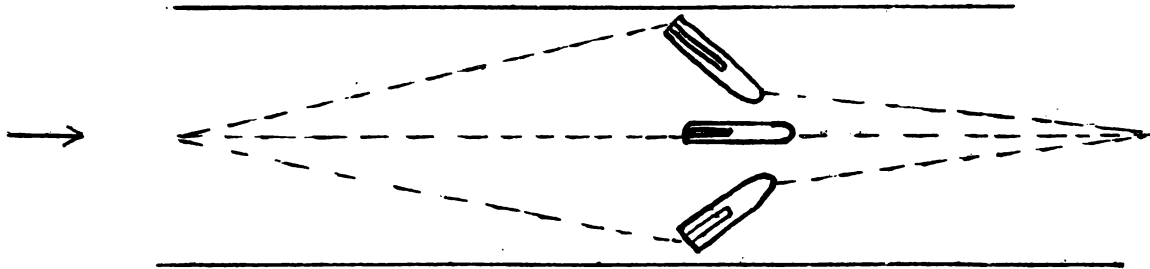
Les dragues à godets sont celles qui conviennent le mieux pour draguer un profil déterminé, par contre elles exigent de ce fait des dispositifs assez compliqués ou gênants pour l'avancement.

Le travail par labourage n'est pas convenable pour le dragage à profil; comme il est plus simple et gêne moins la navigation, il est parfois employé pour l'exploitation des bancs de gravier. La drague a généralement 6 ancrés ou points d'amarrage, à l'avant, à l'arrière et deux par bord. Il y correspond 6 câbles ou chaînes actionnés par treuils. Pour ne pas gêner la navigation, ces chaînes sont souvent sous eau et traversent la coque du navire par des fruites à chaînes. Dans le labourage, l'ancre d'amont est principale, le bateau avance par baloage sur cette ancre; les amarres latérales servent au guidage et ne sont pas indispensables.



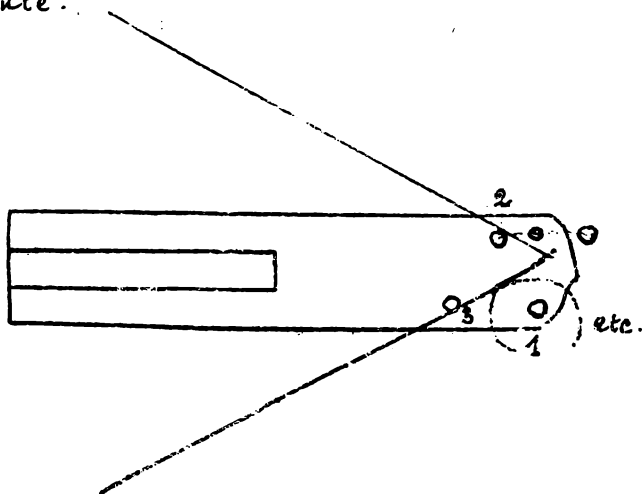
La méthode ordinaire de travail de la drague est le papillonnage, la drague se déplace latéralement en pivotant autour de son ancre d'amont suivant un arc de cercle, les amarres latérales sont balées

ou filées en conséquence. La drague opère donc en fauchant, en enlevant des tranches transversalement. après une oscillation pendulaire, on hale sur l'ancre d'amont pour attaquer en sens inverse une nouvelle tranche transversale.



La drague travaille de préférence \parallel au courant et toujours avec la chaîne à godets opposée au courant. Lorsque les berges sont en pente très douce, la drague peut être obligée de s'incliner obliquement à proximité des rives.

Dans les dragues américaines, les ancres d'avant et d'arrière sont souvent supprimées et remplacées par un pieu qui traverse la coque du navire à l'arrière et s'enfonce dans le sol. Un treuil sert à retirer le pieu, à la descente son poids suffit pour la pénétration. La drague travaille en pivotant autour du pieu, au moyen d'amarres ou mêmes d'hélices transversales. Pour l'avancement, on dispose parfois deux pieux, à droite et à gauche. après un pivotement complet autour d'un pieu, on enfonce l'autre et relève le premier. La drague s'avance de cette manière d'une quantité suffisante.



Enfin, dans des cas spéciaux, les dragues travaillent sans amarres en étant guidées par un chemin de roulement en charpente métallique, établie sur pontons en travers de la sunette à draguer. La drague se déplace latéralement.

ralement en prenant appui sur cette charpente et éventuellement en pivotant ; le mouvement d'avancement s'obtient par déplacement longitudinal des pontons avec leur charpente.

§ 6. Évacuation des déblais.

La méthode la plus ordinaire consiste à vider les déblais dans un chaland (draques à benues, drag-lines, draques à godets et à suction) Ces chalands sont remorqués à l'endroit du débarrasement et ensuite déchargés. La charge des chalands n'est pas coûteuse ; le remorquage l'est davantage surtout si l'on ne dispose pas de moyens mécaniques ; enfin le débarrasement l'est beaucoup si l'on ne dispose pas de moyens spéciaux. Si les chalands doivent être balés et déchargés à bras d'homme, le prix du m³ de dragage devient élevé. L'emploi de chalands à clapets, se vidant par le fond ou latéralement permet de le réduire déjà presque de moitié. Le remorquage mécanique est recommandable, d'autant plus que le lieu du débarrasement doit toujours être assez éloigné du lieu de fouille. Éventuellement, les chalands seront auto-propulseurs (moteurs à huile lourde).

Les draques marines sont presque toujours porteuses et auto-propulsives ; elles remplissent aussi des chalands par temps calme.

On peut vider les chalands au moyen de grues à benues, d'élevateurs à godets ou au moyen de pompes, après avoir délayé les déblais par de l'eau sous pression. Il existe des succuses spéciales construites dans ce but, sur ponton ou sur estacade. Certaines draques à godets ou à suction sont munies des dispositifs nécessaires pour délayer les produits de dragage et en provoquer le refoulement.

Lorsque les déblais peuvent être déchargés sur le terrain ferme, on y procède aux petites distances par des couloirs inclinés, le plus souvent suspendus par des cables obliques à une flèche portée par la draque. La portée peut atteindre jusqu'à 70 mètres, l'inclinaison des couloirs est $\frac{1}{10}$. Il faut que le mélange soit

très fluide, éventuellement on envoie un jet d'eau dans le couloir.

Si l'on préfère procéder avec des déblais plus secs, on peut se servir de transporteurs à courroies alimentés par la goulotte de la drague. Ce système permet des transports quelconques.

Enfin, le refoulement peut s'opérer à grande distance dans des conduites, soit par la pompe de la drague à succion même, soit par une pompe spéciale, comme il a été dit ci-dessus. Lorsque la drague travaille à petite distance de la rive et en eau calme, on peut utiliser des conduites sur flotteurs à joints flexibles en caoutchouc ou cuir armé de spires de fil de fer ou à rotules. Sur la terre ferme, les conduites sont à joints rigides et supportées par des supports appropriés, par exemple des chevalets en bois. De distance en distance, on dispose des joints de dilatation. La vitesse du mélange est en moyenne de 3 m//'' ; pour une proportion de matière solide de 20 %, la perte de charge correspond en moyenne à une élévation de 2 à 3 mètres par 100 mètres de conduite. On atteint rarement 1000 mètres avec une pompe ; on peut les monter en série pour les distances exceptionnellement supérieures.

Le débit moyen en terres est donc :

$$0,20 \frac{\pi d^2}{4} \times v = 0,15 \pi d^2 \text{ m}^3//'' \quad (d \text{ en m}).$$

pour $v = 3 \text{ m//''}$.

La puissance nécessaire en moyenne est :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\pi d^2}{4} \times v \times 1200 \times H \times \frac{1}{\eta} \text{ C.V.}$$

d étant le ϕ en m. de la conduite

v la vitesse en m//'' dans la conduite.

H la hauteur fictive de refoulement.

ρ étant le rendement = 0,4

Elle peut s'écrire $10 \pi d^2 v H \text{ C.V.}$

Exemple : $d = 0,30$ $v = 3 \text{ m//''}$ $H = 20 \text{ m}$ ($L = 1000 \text{ m. env.}$), $\text{puiss.} = 170 \text{ C.V. env.}$

Débit environ $2,6 \text{ m}^3 \text{ terres//''}$ ou $160 \text{ m}^3 / \text{heure}$

d'après l'article de M^e Blancq de la R. V. M. du 1-2-28, comme la vitesse pratique dans les conduites dépasse toujours la vitesse critique,

la perte de charge pour 1000 m. de refoulement est :

$$H = \frac{v^2}{10d} \left(\frac{271,8}{\sqrt{\alpha}} + 3,4 \right)$$

$\alpha = 10^6$ rd. à la température ordinaire de 10-15° Cent. et pour une densité de mélange moyenne de 1200. Toutes ces formules sont en fonction du mètre.

Pour l'exemple envisagé, on trouve $H = 18,60$ m.

Dans les courbes, la perte de charge serait $h = z \frac{v^2}{2g}$ (avec $z = 0,15 + 0,035x$), x étant la teneur de boue en %.

Ces formules correspondent toutefois à des matières relativement fixes. Il est probable qu'avec du sable très graveleux, des petits graviers etc, la perte de charge kilométrique se rapprocherait de 30 mètres.

Le prix par m³ transporté par ces divers appareils dépend dans une large mesure de la quantité annuelle totale et peut varier dans de larges limites. Les appareils doivent donc être proportionnés au travail prévu et à la puissance des dragues. Les chalands doivent avoir une capacité d'environ 1/1000 de la quantité annuelle totale à transporter et d'environ 1 heure de travail à la drague pour travailler économiquement. Une suceuse pour le déchargement de chalands ne travaille économiquement que si la quantité annuelle est d'au moins 500.000 m³. Le prix de transport et de déchargement est dans ces conditions égal ou peu supérieur au prix de dragage proprement dit.

§ 7. Moyens spéciaux.

Dans certains cas, pour des vases ou sables très fins, on a proposé de débayer ces terres par le moyen de brosses traînées sur le fond, ou par des jets d'eau sous pression, par des agitateurs à pales ou en forme de roues à aubes etc, qui sont destinés à mettre les terres en suspension et à les déplacer, de manière à approfondir si possible certains chenaux. Ces appareils sont très particuliers et ne

peuvent faire l'objet d'une étude détaillée.

§ 8. Dérochements

Les déblais rocheux sous eau sont particulièrement difficiles. Leur reconnaissance par sondage est déjà malaisée. Les forages, tant que de reconnaissance que de mine, se font surtout au trépan; la tige est guidée depuis le fond jusqu'au dessus de l'eau par un tube de sondage. Les appareils sont montés sur pontons, de préférence sur estacade, si c'est possible à proximité des rives.

Le plus souvent pour les dérochements importants, on procède par minage. Les charges sont disposées dans des trous de mine verticaux comme à sec. Les charges peuvent être plus fortes avec profondeur croissante; il faut être prudent cependant à proximité des berges pour éviter des ébranlements préjudiciables à leur stabilité permanente.

À grande profondeur et en mer; les forages deviennent malaisés. On peut alors agir au moyen de charges superficielles, souvent très fortes, placées au moyen de scaphandres.

L'action superficielle des charges est moindre que l'action interne, la profondeur d'action d'une charge concentrée est proportionnelle à la $\sqrt[3]{}$ de la charge; le procédé est donc coûteux en explosifs, mais économique pour la mise en place des charges dans les circonstances définies. L'antagonisme des deux facteurs s'établit dans chaque cas la limite d'emploi économique du procédé. Au total, l'emploi de charges superficielles ne convient que pour des travaux de médiocre importance.

On peut aussi employer la cloche à plongeur ou le caisson cloche pour forer des trous de mine à l'air comprimé par exemple. Les débris de l'explosion sont enlevés au grappin ou à la drague, par exemple à pelle.

En rivière et pour des dérochements isolés, sur de faibles profondeurs (approfondissement d'un thalweg, écartements de seuils etc)

on peut employer le choc d'un mouton à chute libre pour briser la roche ; les éclats sont ensuite enlevés à la drague . En Angleterre , des pilons spéciaux ont été construits pour des travaux importants (Ex. pilon Eobnitz , poids 15 T , long 12 m , ϕ 0,45 cm. en acier coulé à pointe en acier chromé - Voir Tech. des tr. n° 1 de 1926 , p. 40) et n° 9-10 de 1925.

Enfin citons que l'on a aussi effectué des dévochements importants par effondrement , en poussant des galeries jusque sous les récifs à détruire , en les marquant dans toute leur étendue et en enlevant le plus grand cube possible. On introduit ensuite de fortes charges de dynamites et on noie les cavités , on fait sauter toute la roche en une fois.

Il est rare cependant qu'il ne faille pas draguer ou détruire après coup à la mine les plus gros débris. Le procédé à l'avantage de créer le moins d'entraves à la navigation pendant l'exécution , par une explosion unique.

Les galeries sont creusées à partir de la base d'un puits foré dans le récif à l'abri d'une enceinte étanche , ou d'une émergence (île) voisine ou à partir de la rive.
