

COURS

DU

GENIE CIVIL

PONTS MOBILES

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

IMPRIMERIE LITHOGRAPHIE

AUG. PHOLIEN

57, RUE SUR LA FONTAINE, 57

LIEGE

Ponts mobiles

Chapitre I

Ponts levants

Généralités

§ 1. - Dispositions générales.

Les ponts mobiles s'emploient surtout à la rencontre des voies navigables et des routes ou chemins de fer lorsque ces voies se croisent avec une différence de niveau qui ne réserve pas un tirant d'air suffisant pour la navigation. Très rarement, on a construit des ponts mobiles à la rencontre de deux voies navigables (Pont canal mobile) et même d'une route et d'une voie ferrée (Friedrichsbrücke à Dresde). Ils ne permettent la circulation que sur une seule voie à la fois : sur la supérieure en position fermée ; sur l'inférieure en position ouverte. Il en résulte les mêmes inconvénients que dans les croisements à niveau : gêne de la circulation sur les deux voies ; d'autant plus grande que le trafic est plus considérable sur les deux voies ensemble ; d'autre part danger d'accident résultant de l'interruption d'une des voies lorsque la circulation s'effectue sur l'autre. Les frais d'exploitation sont élevés, car il faut un personnel et une force motrice pour la manœuvre et les dispositifs de sécurité. Les frais de construction aussi sont élevés, par suite des dispositions mécaniques spéciales nécessaires, qui augmentent aussi les frais d'entretien : graissage, surveillance, remplacement en cas d'usure, etc.

Il résulte de tous ces inconvénients que l'on cherche à éviter le plus possible ces ouvrages en les remplaçant par des dispositifs fixes surélevés,

auxquels on a accès par des rampes perpendiculaires ou parallèles aux rives ou bien courbes, selon les dispositions locales. Sur une voie navigable d'intérieur, le tirant d'eau minimum est de 4,00 ou davantage, d'après le matériel flottant. En tenant compte de la revanche minimum par rapport aux rives et en réduisant l'épaisseur du tablier au minimum, on voit que la hauteur des rampes peut n'être pas supérieure à 4,00 m. et généralement moindre. Il est donc souvent possible, même dans les villes, de les construire. Dans le tracé des nouvelles voies de communication, il faut d'ailleurs tenir compte de cette question et choisir les niveaux de telle sorte que les ponts mobiles soient évités. Il faut se résoudre à y recourir dans les agglomérations bâties, lorsqu'elles ne permettent pas la construction des rampes d'accès. Ils sont aussi très répandus pour le franchissement des voies de navigation maritimes: canaux, estuaires, chenaux et ports, à cause du tirant d'eau considérable exigé par les navires. Afin de ne pas interrompre la circulation des piétons, on double parfois les ponts mobiles, sur les voies de navigation intérieure, par des passerelles fixes surélevées, auxquelles on accède par des escaliers ou rampes à forte inclinaison.

§ 2. Dispositifs de sécurité.

Par suite du danger d'abordage des ponts mobiles par les bateaux, en position fermée, et du danger de chute dans l'eau des véhicules, en position ouverte, il faut prévoir des dispositifs de sécurité. Si le pont mobile livre passage à un chemin de fer, il est couvert dans les 2 sens par un signal spécial, selon les règles ordinaires de la sécurité. Ce signal est enclenché avec la manœuvre du pont, de sorte que le pont ne peut être ouvert que si les signaux de part et d'autre sont à l'arrêt, et que les signaux ne peuvent donner la voie libre que si le pont est fermé.

Les signaux électriques optiques commencent à se répandre pour la circulation rapide sur les routes. Il est donc utile de prévoir pour une route fréquentée une signalisation enclenchée avec la manœuvre du pont, comme pour les chemins de fer. En outre, il faut prévoir des barrières, dont les plus appropriées sont les barrières basculantes ou

roulantes : pour les voies peu fréquentées on emploie aussi des chaînes. Il est recommandable que les barrières soient enclanchées avec la manœuvre du pont. Sans la voie d'eau, les dispositifs de sécurité consistent surtout en estacades et ducs d'Albe, pour guider la marche des bateaux dans les passes rétrécies que constituent généralement les ponts mobiles, et permettre éventuellement des manœuvres d'arrêt et d'amarrage.

Enfin, il faut éventuellement une signalisation optique pour la voie d'eau, également enclanchée avec la manœuvre du pont. Cette disposition est favorable pour éviter les accidents par malentendus et définir les responsabilités : elle est nécessaire sur les voies maritimes où la navigation s'effectue la nuit et par temps de brouillard. Le pont et ses abords doivent être éclairés électriquement en toutes circonstances.

Un grand pont mobile devient donc ainsi une installation très importante, dont la conduite est effectuée d'un poste de commande, réglant par l'action d'un fluide moteur, les opérations successives dont l'ordre est mécaniquement fixé. Il faut donc un personnel permanent et compétent. Ce personnel est logé sur place dans des habitations qui, avec les magasins, salle de machines etc, forment les annexes d'un grand ouvrage de ce genre. Sur les voies d'eau intérieures, si la navigation ne s'effectue que de jour, les pontonniers ne sont généralement présents que pendant les heures de service ; les annexes se réduisent éventuellement à un simple abri et les dispositifs de sécurité sont souvent des plus sommaires.

§ 3. Ponts levants.

Les ponts levants sont constitués par des tabliers reposant en position fermée sur deux culées, comme les ponts ordinaires et qui peuvent être soulevés par translation verticale jusqu'à hauteur voulue pour permettre le passage des bateaux. Ce système convient donc surtout pour les canaux de navigation intérieure, les hauteurs de levage étant faibles. Il a l'avantage de ne pas exiger plus d'espace qu'un pont ordinaire. Généralement, pour réduire le poids à élever, on diminue la superficie du tablier autant que possible, notamment la portée.



Pour les canaux, cela peut se faire par un rétrécissement de la section, la passe entre les culées ayant éventuellement la largeur suffisante pour le passage aisé d'un seul bateau. Cette disposition est très défavorable pour la navigation, car elle oblige éventuellement les bateaux à attendre, et le passage dans la passe rétrécie est difficile. En rivière, ce dispositif est inadmissible, par suite du courant et de l'obstacle à l'écoulement des eaux qui constituerait un tel rétrécissement. La meilleure solution consiste en tous cas à ne pas rétrécir la voie d'eau mais à établir vers les 2 rives des travées d'approche fixes, entre lesquelles se trouve la travée mobile au dessus du chenal navigable. Si les travées d'approche sont en rampes, on réduit d'autant la hauteur du levage. Les efforts à vaincre dans la manoeuvre sont le poids constant du tablier mobile et les effets de l'accélération. Leur valeur instantanée totale est donc :

$$F = P \left(1 + \frac{dv}{g dt} \right).$$

$\frac{dv}{dt}$ étant l'accélération.

En régime, on considère une vitesse de levage constante V , alors $\delta = 0$; $F = P$ et la puissance effective est $\Phi = \frac{PV}{\eta}$, η étant le rendement des mécanismes moteurs. Au démarrage et lors de l'arrêt, il y a des périodes variables dont la loi dépend des puissances de démarrage et d'arrêt du moteur. On est en présence d'un cas d'appareil de levage assez simple.

Dans la manoeuvre par presses hydrauliques, il faut une légère surpression au début. Si elle est constante pendant la période de démarrage, le mouvement est uniformément accéléré et la loi de la vitesse est $\frac{dv}{dt} = g \times \frac{F-P}{P}$, $v = g \frac{F-P}{P} T$.

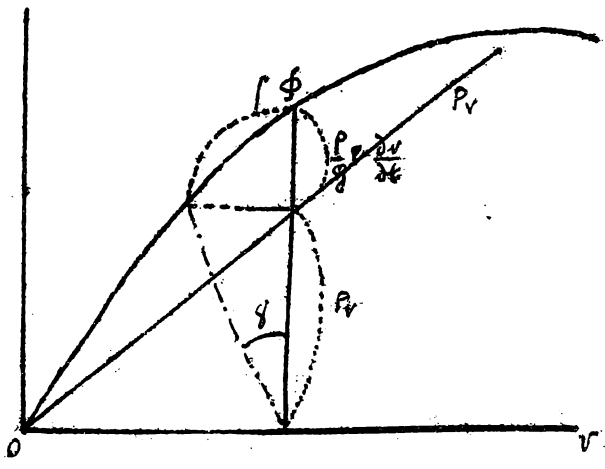
Dans la suite, l'immersion progressive des plongeurs de presse augmente le poids et réduit l'action motrice; l'accélération est uniformément diminuée. L'arrêt progressif se réalise facilement. Comme la course n'est pas strictement limitée vers le haut, la période d'arrêt n'est pas dangereuse et il ne faut pas de heurtoirs de fin de course; mais un dispositif automatique d'arrêt suffit.

$$P_{\text{inst}} = P + 2m v \frac{dv}{dt}$$

Avec un moteur à vapeur ou électrique, la puissance instantanée est :

$$\int \Phi = P v + \frac{P}{g} v \frac{dv}{dt}$$

Les dimensions des mécanismes étant connues ainsi que les courbes caractéristiques du moteur, on peut tracer le diagramme de $\int \Phi$ en fonction de v . On en déduit les ordonnées de la droite Pv . Les ordonnées différen-

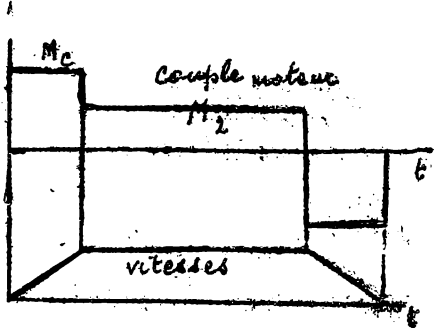


tielles représentent $\frac{P}{g} v \frac{dv}{dt}$ et leur rapport à l'ordonnée Pv est proportionnel à l'accélération, qui peut donc être représentée par $A \gamma$.

Il faut, bien entendu, tenir compte d'une manière quelconque de l'accélération du mécanisme (voir chap. IV). Les conditions dynamiques sont analogues à celles que l'on ren-

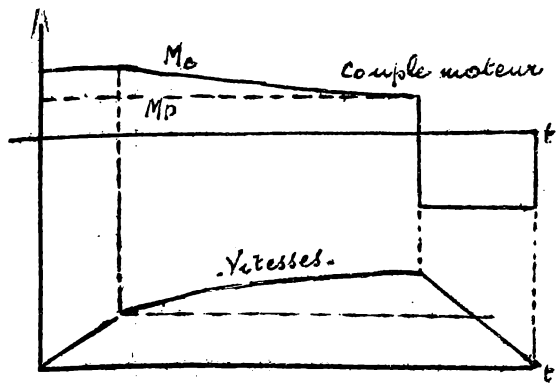
contre dans les barrajes mobiles levants, avec l'avantage que le rapport de l'effort de démarrage à l'effort moyen est plus petit.

La puissance se détermine par la durée maximum d'ouverture imposée dans les conditions les plus défavorables. L'action résistante étant sensiblement constante, on peut théoriquement envisager le démarrage et le freinage à couple moteur constant, le couple moteur équilibrant exactement le couple résistant entre ces périodes. Dans ces conditions, le diagramme des vitesses est formé de 2 droites obliques réunies par une horizontale. Ce système utilise mal la puissance



du moteur, et exige une plus forte puissance maximale, pour une même durée de manœuvre, que la méthode consistant à conserver un couple moteur supérieur au couple résistant jusqu'au moment du freinage ou de l'arrêt du moteur, qui

s'effectue relativement plus tôt. Il faut bien entendu limiter les vitesses maxima, et pour éviter les accidents, assurer l'arrêt ou le freinage automatique.



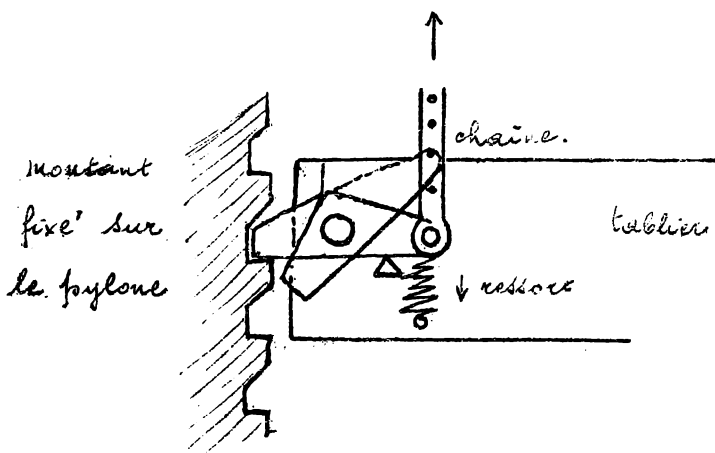
Le rendement d'ensemble est le produit du rendement du moteur par celui des mécanismes. Ce dernier rendement se détermine de la manière que nous avons indiquée pour les barrages mobiles. Pour réduire les efforts de levage, on ne peut agir que sur le poids. On le

réduit en allégeant toute la construction, notamment la voie, que l'on constitue par un double platelage en madriers. Ce dispositif, économique de construction, exige des réparations fréquentes et est donc coûteux d'entretien ; il est défavorable à la circulation. On protégeait anciennement le bois de l'usure par un revêtement en cables plats d'aloès ou de chanvre.

Un autre système consiste à équilibrer partiellement le poids au moyen de contrepois suspendus à des chaînes galle, qui passent sur des poulies à empreinte portée par des pylônes. Si ces poulies sont cinématiquement dépendantes, ce système assure en outre le déplacement parallèle du tablier. On peut réduire ainsi considérablement les efforts de levage. Le poids est décroissant pendant le levage par suite du déroulement des chaînes. L'inconvénient du système réside dans l'encombrement et le prix des contrepois et des supports. Cependant, comme ce système permet la construction d'un tablier durable en béton et que l'on peut limiter l'équilibre à une fraction, il est très souvent recommandable. On confectionne des contrepois économiques au moyen de caisses de tôle lestées de déchets ferreux lourds, agglomérés au mortier. Mais au point de vue de l'encombrement et de l'aspect, des contrepois en fonte paraissent préférables. Nous ne citons que pour mémoire l'équilibrage par flotteurs, qui peut présenter des avantages dans des cas très spéciaux.

À la descente le poids est moteur. Une chute rapide du pont serait très mauvaise pour le tablier, qui se disloquerait. Il faut donc une descente commandée par mécanisme irréversible ou freinée, de préfé-

rence par récupération, ce qui est possible avec la manoeuvre électrique et aussi avec la manoeuvre hydraulique par accumulateurs. L'équilibrage est aussi favorable pour la descente, mais il introduit un danger nouveau, celui de chute en cas de rupture d'une chaîne d'équilibrage. Ces chaînes doivent donc donner une sécurité très élevée et en outre ; il faut prévoir des parachutes, dont le plus simple est un cliquet qui un ressort engage dans les encoches d'un montant en regard ou dans la denture du pignon de manoeuvre. Si la tension de la chaîne disparaît. Le calcul des dimensions de ce parachute ne



présente aucune difficulté. On peut aussi assurer la suspension par vis sans fin et écrou irréversible ; les vis en acier forgé doivent être à toute épreuve. Enfin, il faut un guidage pour assurer le déplacement du tablier et éviter les oscillations

par le vent etc. Le guidage ne doit toutefois pas être trop serré ; il est réalisé par des glissières fixées sur les pylônes et sur lesquelles se meuvent des règles ou galets de guidage. Le déplacement est assuré le mieux par les chaînes tendues passant sur des poulies synchronisées ou par des pignons synchronisés engrenant avec des crémaillères fixés aux pylônes.

§ 4. Ponts levants à presses hydrauliques.

Il y a 4 ou 2 presses, soit aux extrémités des poutres principales, soit aux milieux des traverses extrêmes, qui doivent donc être très fortes. Les cylindres des presses sont dans des fûts établis dans les culées, donc sous le niveau de l'eau, ceci d'autant plus que le levage est plus considérable. Comme il est recommandable d'y pouvoir accéder, il en résulte l'inconvénient d'évidements sous eau. Ces vérins doivent être bien appuyés, notamment dans le sens transversal. Le meilleur système est de les fixer par boulons sur des chevêtres

métalliques rigides encastrés dans la maçonnerie de la chambre des presses. Les têtes des presses sont avantageusement à rotules et même à glissières, pour permettre les dilatations. Une disposition convenable pour les grandes portées est celle des ponts de Rubeck (45.00). Une des traverses des vérins est invariablement fixée au tablier, l'autre reçoit l'appui des longerons par des rouleaux de dilatation. Ces traverses sont guidées dans des glissières latérales. Le pot de presse est en acier coulé ou embouti et est fermé par un presse-étoupe à manchette de cuir. Le plongeur peut être en fonte. La pression est généralement de l'ordre de 50 à 60 kg/cm². Pour éviter la congélation, il est bon de glycériser l'eau. Lorsque il existe un accumulateur, celui-ci doit équilibrer le poids, comme nous l'avons vu. Le mouvement peut être commandé par pompage, lestage de l'accumulateur ou translation verticale du piston de l'accumulateur par pignon et crémaillère à commande électrique, comme au pont de Rubeck. Le dernier système est très économique au point de vue de l'énergie. Pour les petits ponts et les petits levés, même s'il n'y a que 2 vérins, le guidage peut être supprimé. Pour les grands ponts, il est nécessaire, et il faut donc des pylônes assez rigides, souvent entretoisés de manière à former portique. On peut alors assurer le déplacement // du tablier par pignons synchronisés et crémaillères; on peut aussi, pour réduire l'importance des vérins, établir des contrepoids.

§ 5. Ponts levants à levage électrique.

Le levage peut s'opérer :

- 1°) par pignons synchrones engrenant dans des crémaillères fixés aux pylônes;
- 2°) par pignons synchrones fixés au sommet des pylônes et entraînant des chaînes Galle tendues par contrepoids;
- 3°) par vis sans fin portées par les pylônes et écrous solidaires du tablier.

Le plus simple est d'animer les écrous de mouvements synchrones. Par conséquent, si dans le deuxième système, le moteur et les mécanismes sont établis sur les parties fixes de l'ouvrage, dans les deux autres ils

sont solidaires du tablier, ce qui est un désavantage. D'autre part, comme un équilibrage partiel est favorable, c'est le second système qui convient le mieux. C'est aussi celui qui permet le plus librement les dilata-tions en position ouverte sans dispositifs spéciaux ; c'est le plus simple au point de vue mécanique s'il y a équilibrage. Les pignons sont synchro-nisés par des axes et renvois coniques, ce qui exige qu'un axe soit établi entre les deux culées. Il faut donc entretoiser au moins deux py-lones de rives opposés et le plus souvent les quatre pour des raisons d'aspect. C'est un inconvénient du système par rapport aux deux autres. On a parfois cherché à tirer partie de cette nécessité pour établir entre les pylones une passerelle pour piétons et une passerelle de service, les mécanismes moteurs étant à la partie supérieure. Il faut une com-mande à main de secours.

Le dispositif à vis sans fin est avantageux en ce sens qu'il n'exige pas de parachute, mais le rendement mécanique est mauvais.

§ 6. Calcul et construction du tablier.

En position fermée, le tablier repose sur des appuis ordinaires, de manière à décharger les mécanismes. Cependant, par suite de l'équili-brage, les appuis ne portent pas tout le poids propre. Il peut en résul-ter du battement au passage des charges mobiles. L'équilibrage total est défavorable donc. Le tablier se calcule comme un tablier ordinaire, il peut être biais. Sous la construction, il faut rechercher la légèreté et la faible épaisseur, conditions antagonistes. Il faut préférer la légè-reté. On emploie donc généralement deux longerons avec entretoises et en encorbèlement. Le platelage est en béton armé aussi lé-ger que possible, recouvert d'une mince couche d'asphalte. Sous fonctions du tablier et de la chaussée, un garde-voie métallique ou en béton armé couronne la banquette d'appui des culées.

Chapitre II

- Ponts basculants -

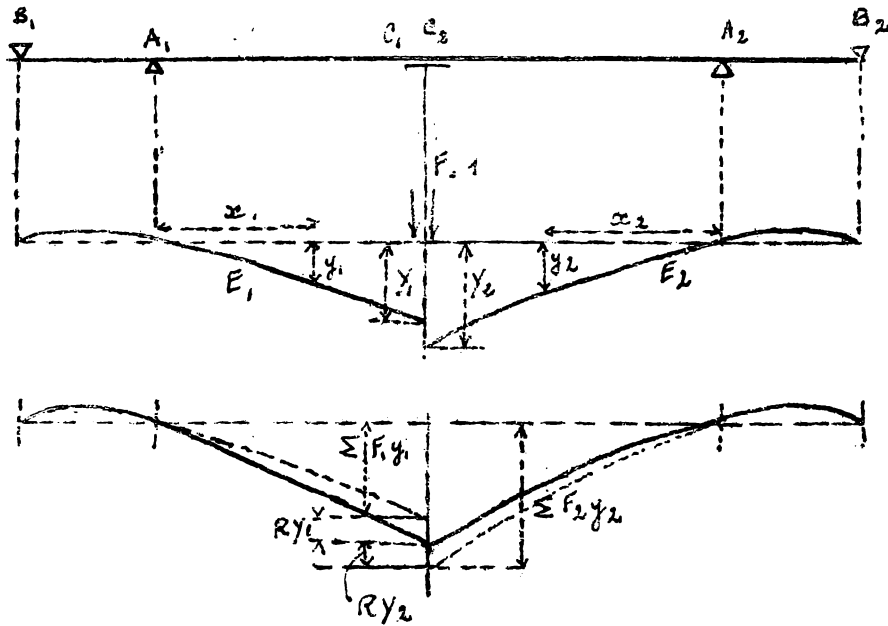
§1. Caractères généraux des ponts basculants.

Le tablier des ponts basculants peut être animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe horizontal ; en position ouverte il est dressé verticalement et dégage donc complètement la passe. Ce mouvement est indépendant de l'importance du déchargement, qui est total. Pour les faibles tirants d'air, on peut se borner à une ouverture partielle. La partie du tablier qui couvre la passe navigable porte le nom de volet. Elle est toujours équilibrée d'une manière presque complète par des contrepoids disposés à l'opposé de la volet par rapport à l'axe et qui constituent la culasse. Les bras de levier varient pendant la rotation, il faut que les dispositifs cinématiques assurent la constance de l'équilibre.

Dans les ponts basculants comme dans tous les ponts mobiles, on cherche à réduire l'importance de la partie mobile en réduisant la largeur de la passe navigable. Les nécessités de la navigation imposent une limite dans cette voie. Pour éviter les courants violents, il y a intérêt à construire des traverses d'approche fixes réunies par le pont basculant. Cette disposition n'est pas compatible avec tous les systèmes. Sauf pour les très petites passes, on réduit généralement l'importance du tablier en le divisant, donc en employant un pont basculant à double volet, une à chaque rive. En position fermée les deux volets se rejoignent au milieu de la passe et doivent être renouillés ensemble, pour éviter les dénivellements relatifs sous l'effet des charges mobiles, qui gêneraient la circulation et seraient nuisibles à l'ouvrage. Ce renouillage introduit dans le système une condition d'hyperstaticité.

Considérons un pont à double volet du type ordinaire à culasse.

Chaque tablier possède un appui fixe en A_1 ou A_2 , et un appui de culasse ou de butée en B_1 ou B_2 . Le verrouillage des extrémités voisines C_1 et C_2 assure l'égalité des flèches, mais doit permettre les dilatations.



Examinons l'effet des charges mobiles en supposant d'abord le pont non verrouillé. Considérons une charge verticale F égale à l'unité agissant en C_1 , et déterminons l'élastique $y_1 = f_1(x_1)$ de $A_1 C_1$. Effectuons la même opération pour $A_2 C_2$, nous obtenons l'élastique $y_2 = f_2(x_2)$. En vertu du théorème de Maxwell, la flèche y_1 en un point x_1 est égale à la flèche qui se produit en C_1 lorsqu'une force $F = 1$ agit au point x_1 . Donc l'élastique E_1 est la ligne d'influence de la flèche y_1 en C_1 , lorsqu'une charge $F = 1$ se déplace de A_1 en C_1 . De même, l'élastique E_2 est la ligne d'influence de la flèche y_2 en C_2 pour une charge mobile $F = 1$. Si les charges sont en C_1 et C_2 , $y_1 = Y_1$ et $y_2 = Y_2$. En cas de verrouillage, les flèches en C_1 et C_2 sont égales, donc

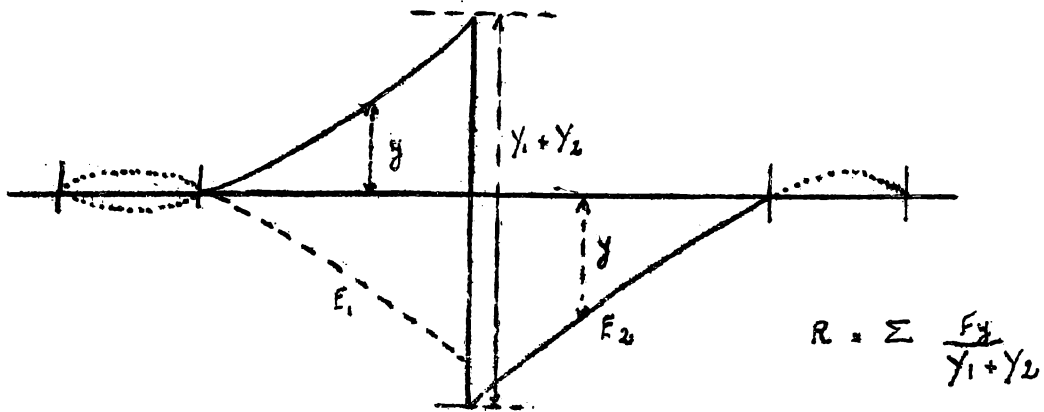
$$R Y_1 + \sum F_1 y_1 = \sum F_2 y_2 - R Y_2$$

en appelant R la réaction mutuelle due au verrouillage, dont nous envisageons celle qui est exercée par la travée de droite sur la travée de gauche comme positive. L'autre est égale et opposée. Donc

$$R = \frac{\sum F_2 y_2 - \sum F_1 y_1}{Y_1 + Y_2} \text{ en valeur absolue si } \sum F_2 y_2 > \sum F_1 y_1$$

Pour obtenir la ligne d'influence de R , nous ne pouvons considérer qu'une seule force F égale à l'unité circulant sur l'une ou l'autre

travée. Elle se compose donc de 2 segments. Si un pour la voûte $A_1 C_1$ est $\frac{R}{F} = -\frac{y_1}{y_1 + y_2}$, l'autre pour la voûte $A_2 C_2$ est $\frac{R}{F} = \frac{y_2}{y_1 + y_2}$.



Les forces ont le même sens que les flèches correspondantes. Donc, la ligne d'influence spécifique de R se compose de l'élastique F_2 et de la symétrique de l'élastique F_1 , par rapport à $A_1 C_1$, à une échelle facile à déterminer. Cette ligne d'influence permet de déterminer les effets d'un train de forces mobiles quelconques, ainsi que d'une surcharge uniforme mobile. Si le poids mort est supposé uniforme, son effet est donné par l'aire totale de la ligne d'influence et est d'ailleurs égal à $\frac{y_2 - y_1}{y_1 + y_2}$, y_1 et y_2 étant les flèches des travées non verrouillées sous l'effet du poids mort. Cette étude générale permet de tenir compte des différences de rigidité des 2 voûtes. Sans un calcul de projet de pont à deux voûtes symétriques, on admet naturellement que $y_1 = y_2$ et que $y_1 = y_2 = y$, ainsi que $y_1 = y_2 = y$. Les deux segments F_1 et F_2 de la ligne d'influence sont donc symétriques par rapport à C . On a $R = \sum \frac{Fy}{2y}$, y étant une ordonnée courante de la ligne d'influence. Il n'y a pas de réaction de verrouillage de poids mort. L'indétermination statique est levée, et en tenant compte de $\pm R$, on peut tracer les lignes d'influence de tous les autres éléments de la sollicitation. Dans certains cas, notamment lorsque les membrures inférieures sont courbes, on substitue au verrou une rotule réglable, et le pont travaille en position fermée comme un arc à 3 rotules.

Une voûte considérée isolément est évidemment isostatique. Il en est de même d'une voûte unique, sous réserve du verrouillage et de la butée de culasse dont, autant que possible, les effets ne doivent pas influencer

les déplacements élastiques et thermiques, mais simplement empêcher les déplacements cinématiques intempestifs. Dans les dispositifs hyperstatiques, il faut envisager les effets des températures inégales des membrures.

§ 2. Étude dynamique générale. -

Les efforts à vaincre dans le mouvement d'un pont basculant proviennent : 1°) du poids P_v de la volée et du poids P_c de la culasse dont les moments s'équilibrent complètement ou presque.

2°) des moments d'accélération, dont les effets dépendent des rayons de giration, dont la détermination rigoureuse par le calcul est quasi impossible.

3°) des frottements des axes sur les coussinets ou des secteurs sur le chemin de roulement.

4°) du vent sur le tablier en position levée.

L'effet du poids décroît depuis la position extrême de fermeture à la position extrême d'ouverture; c'est l'inverse pour le vent, que l'on doit considérer comme soufflant debout. On peut admettre une pression du vent moindre que celle qui est employée pour les calculs de résistance des constructions de hauteur analogue exposées de la même manière.

En Belgique, on envisage, d'après le Règlement des Ponts et Chaussées (A.T.P. B août 1926) 25 à 75 kg/m² pendant la manœuvre, selon les besoins de la navigation. Ces chiffres sont applicables à tous les ponts mobiles. Pour les calculs de stabilité, on envisage 150 kg/m² lorsque le pont est ouvert et l'effort ordinaire du vent lorsqu'il est fermé (jusqu'à 250 kg/m²).

La manœuvre de descente doit être freinée.

En vue d'éviter les flexions par inertie de la volée et les réactions dynamiques sur l'axe et sur l'extrémité de la culasse, l'entrée en contact de cette extrémité avec ses appuis doit être particulièrement douce. Il n'y a cependant généralement pas de butoirs élastiques, les appuis de butée devant être rigides pour assurer l'équilibre du pont en position fermée. Il est donc nécessaire de limiter les vitesses de fermeture. Éventuellement, on pourrait prévoir des heurtoirs élast.

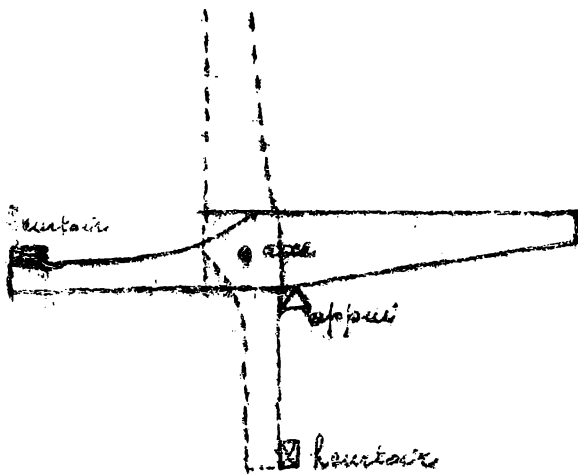
tiques et un verrouillage de culasse assurant la butée.

§ 3. Appuis et verrous.

Si le pont est à travée simple, l'extrémité de la volée repose en position fermée sur des appuis de dilatation simples. En outre, elle est toujours verrouillée à la culée par verrou glissant ou crochet.

L'extrémité de la culasse est appliquée à fond de course dans les 2 positions contre des heurtoirs. En position fermée, elle est en outre verrouillée à la culée par un verrou glissant, une came ou une lanterne. Pl II. p. 13. -

L'appui sur la culée peut se faire par l'axe, mais le martèlement dû aux charges mobiles est très défavorable. Pour les ponts assez importants, on établit en avant de l'axe des sabots d'appui, avec lesquels les longerons viennent en contact en position fermée. De la sorte l'effet des charges mobiles est reporté sur ces appuis parfois d'ailleurs toute la réaction si l'axe est, par suite du contact de l'appui, détaché de son coussinet. 10.1. -



Le verrouillage des deux volées entre elles peut se faire par des saillies fixes adaptés aux membrures supérieures. Ce système est défavorable. Il exige une simultanéité d'ouverture et de fermeture. Les saillies sont donc très exposées à être faussées ou rompues. L'emploi de verrous glissants est préférable.

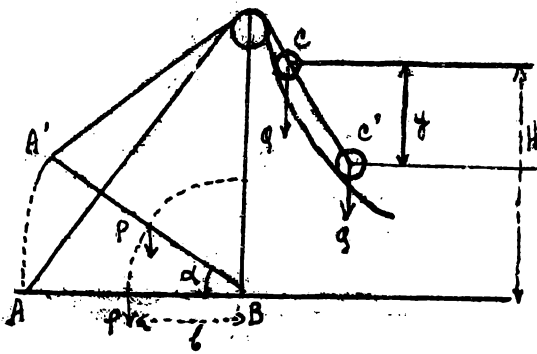
Les verrous ne doivent transmettre que des efforts verticaux, mais pas de moments. On les dispose donc de préférence suivant la fibre neutre ou à la membrure inférieure; on les calcule au cisaillement et à la flexion.

Dans le cas de substitution d'une rotule au verrou, cette rotule peut être réglable par coin, de manière à assurer le contact après fermeture, tout comme dans le verrouillage. Pl II

§ 4. Ponts levés à contrepoids.

Ils constituent les ponts basculants du type le plus ancien. Ils sont dépourvus de culasse et la volée est soulevée à l'aide de deux chaînes qui lui transmettent l'effort de levage. L'attache de ces chaînes est généralement voisine de l'extrémité de la volée.

Ces ponts étaient fréquents dans les anciennes fortifications et de nombreux dispositifs ont été étudiés en vue de réaliser la constance de l'équilibre. Très ingénieux au point de vue cinématique et dynamique ils ne peuvent plus présenter d'intérêt pratique que dans des cas exceptionnels. Le contrepoids à trajectoire sinusoïdale de Belidor ayant cependant reçu en Amérique des applications modernes importantes peut retenir l'attention.



Soit BA la position fermée du pont et C la situation correspondante du contrepoids; BA' et C' les positions respectives pour un angle d'ouverture α . Le contrepoids Q roule sur un chemin de roulement tel que, en appelant y sa dénivellation

verticale par rapport à la position fermée on a :

$$Qy = Pb \sin \alpha. \quad (1)$$

La hauteur du centre de gravité de l'ensemble au dessus de AB est

$$h = \frac{Pb \sin \alpha + Q(H-y)}{P+Q} = \frac{QH}{P+Q} = cte$$

Le niveau de centre du gravité étant invariable, le travail total des forces est nul, abstraction faite des résistances passives; donc l'équilibre est constant.

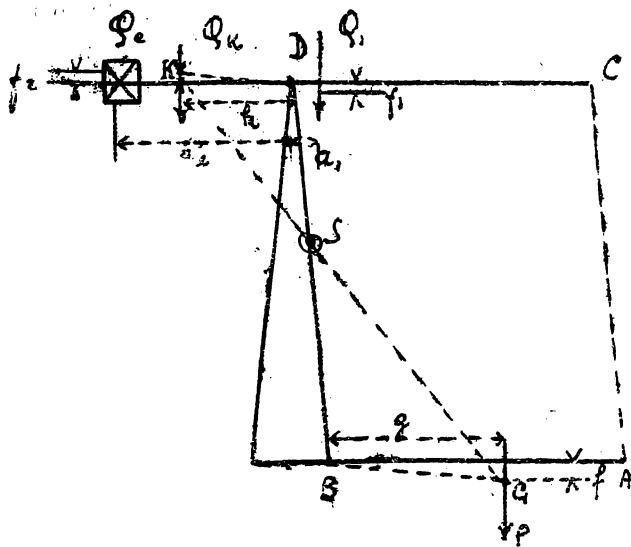
La courbe CC' n'est d'ailleurs pas une sinusoïde, mais une courbe transcendante. On la construit par points, notamment par la graphique, en se basant sur la constance de hauteur du centre de gravité total et la longueur constante de la chaîne.

Généralement l'équilibre n'est pas total. Le levage est assuré par un câble spécial et un petit treuil électrique ou à main.

La manoeuvre est rapide et facile. Ses contrepoids sont des cylindres en fonte, le chemin de roulement est constitué par des membrures métalliques. L'inconvénient réside dans l'encombrement des chemins de roulement, qui n'existe pas toutefois lorsque ces chemins de roulement peuvent constituer, comme dans le pont de Brooklyn (Harway Avenue) les longerons d'une travée d'approche fixe.

§ 5. Ponts levés à flèche. P.T.U.

C'est le type le plus pratique du pont levé et le plus commun pour les petites portées; il est habituel sur les petits canaux du Nord de l'Europe, surtout aux Pays-Bas. Il comporte le tablier, un portique vertical près de l'axe et une flèche parallèle au tablier qui s'articule au sommet du portique. La volée de cette flèche est réunie au tablier par des



chaines ou tiges // à la droite joignant les axes du tablier et de la flèche; ces n éléments forment donc un parallélogramme articulé. La flèche possède une culasse lestée par des contrepoids qui équilibrent presque complètement le système. Soit P le poids total du tablier et G son centre de gravité, Q_1 le poids total de la flèche et K son centre de gravité.

(y compris les chaînes de suspension) Ses conditions de l'équilibre indéterminé sont que BG et DK soient parallèles et que le centre de gravité de tout le système soit en S , intersection de KG et de DB . On voit que, dans ces conditions, dans une position quelconque du pont, les triangles DKS et SBG sont toujours semblables et que S est un point fixe. La valeur du contrepoids Q_2 est :

$$Q_2 = \frac{P_2 + Q_1 a_1}{a_2}$$

Q_1 étant le poids propre de la flèche sans contrepoids et a_2 la distance

choisir du contrepois à l'axe de rotation D de la flèche.

La hauteur f_2 du centre de gravité du contrepois au dessus de la flèche est :

$$f_2 = \frac{P f_1 + Q_1 f_1}{Q_2}$$

dans le cas des dispositions relatives de la figure ci-contre.

La manoeuvre est très aisée si l'équilibrage est complet et en absence de vent ; il n'y a que le frottement des tourillons à vaincre. La manoeuvre peut se faire en tirant à bras sur une chaîne attachée à l'extrémité de la culasse. Mais un équilibrage trop complet est dangereuse, il vaut mieux laisser un excès de poids favorisant la fermeture et adopter un petit treuil sur un montant du portail pour enrouler la chaîne de manoeuvre. On peut aussi réaliser un équilibrage variable au moyen de plaques de fonte amovibles. Les premiers types les plus anciens se faisaient en bois, on emploie encore ces matériaux pour des ouvrages provisoires.

Actuellement, on les construit entièrement en métal. Les tourillons sont en acier forgé, éventuellement durci, les paliers sont à coussinets de bronze graissés ou à rouleaux en acier trempé ; ceux de la flèche peuvent être à billes. Dans les types modernes, dont la portée peut être plus grande, on cherche à dégager les axes inférieurs en position fermée. La portée est toutefois rapidement limitée par la nécessité d'allonger la culasse de la flèche et d'augmenter la hauteur du portique, ou bien d'avoir des contrepois considérables, aussi ne peut-on guère dépasser 10 m. avec une volée.

On a construit des ponts à double travée, mais ils présentent une grande difficulté, qui résulte de l'absence de butée du tablier en position fermée. On doit donc appuyer les volées soit sur des arc-boutants articulés à la base des culées, ou sur des paliers articulés aux extrémités des volées et prenant appui sur le fond de la passe ou enfin, plus généralement, les retenir par des chaînes obliques attachées aux extrémités des volées et aux portiques. Ceux-ci doivent être alors ancrés aux culées par des tirants obliques pour résister à la traction. Ces chaînes ne sont tendues que sous l'effet des charges mobiles, les chaînes de flèche équilibrant le poids propre, en majeure partie du moins. On réalise nécessairement

le verrouillage, parfois même une butée des deux volets; on voit que le système est alors complexe et que le calcul est incertain, car une des chaînes peut n'être pas tendue. Il semble bien que le pont levé ne conviendrait avantageusement qu'en travée simple pour les petites portées, cas pour lequel il reste le type le plus avantageux. Il se combine favorablement avec des travées fixes adjacentes. Sa jonction avec les parties fixes se fait par des garde-grèves et éventuellement du côté de l'axe, par un petit élément de tablier mobile.

§ 6 - Ponts basculants à axes fixes. P. 112.

Les ponts basculants à axes fixes sont généralement à double volet, exceptionnellement à tablier unique (Pont du port d'Amsterdam). Chaque tablier possède une culasse lestée équilibrant la volet. L'équilibrage complet exige que le centre de gravité de l'ensemble soit sur l'axe de rotation. Mais l'équilibrage complet est dangereux et peut donner lieu à des accidents par soulèvement intempêtif, comme il s'est produit sur des ponts basculants de l'Avenue de la reine à Bruxelles (p. 21). La culasse se tient dans un tambour ménagé dans les culées et qui descend généralement sous le niveau de l'eau. Cette chambre doit être étanche et asséchée. Cette disposition est un inconvénient du système, qui empêche notamment son emploi avec des travées fixes d'approche, à moins qu'elles ne soient arrêtées, comme au Tower-Bridge sur la Tamise à Londres, par des piles en maçonnerie assez larges pour y établir les tambours nécessaires. Ce tambour est recouvert d'un tablier fixe en béton armé ou en voûtes sur traverses métalliques. Les tourillons reposent dans des paliers appuyés en arrière du parement des culées sur forts sommiers métalliques en tôles et cornières assemblés et solidement encastés dans les parois du tambour. Les paliers sont à coussinets de bronze graissés ou à rouleaux. L'extrémité de la culasse porte dans la position fermée contre des heurtoirs qui, dans les ponts modernes, sont constitués par une forte traverse métallique ou des labots fortement ancrés par des tirants verticaux dans la maçonnerie de la partie inférieure de la culée.

Les tirants peuvent être réglables par vis, mais il paraît plus simple et plus sûr de reporter le réglage sur les sabots d'appui fixés à la culasse, ce réglage pouvant se faire par coins ou simplement par des lames minces. On peut aussi prévoir un heurtoir de fin de course d'ouverture, car malgré un interrupteur automatique, la vitesse peut se maintenir par exemple si un vent violent favorise l'ouverture. Enfin on prévoit maintenant généralement un soulèvement de l'extrémité de culasse en position fermée, par coins, cannes ou vis, parfois par les mécanismes de manoeuvre mêmes. Il en résulte non seulement un verrouillage de la culasse, mais un soulèvement des tourillons au-dessus des paliers, à l'appui desquels se substituent des appareils d'appui à rotule établis sur la culée en avant des paliers. Cette disposition n'est pas générale toutefois. Enfin les extrémités adjacentes des volées sont verrouillées en position fermée. À la jonction de la volée avec le tablier fixe au-dessus de la chambre de culasse on disposait souvent anciennement un petit élément de tablier articulé. Aujourd'hui on emploie un garde grève spécial en acier coulé ou forgé, solidement encasté dans la culée et dont la face inférieure est profilée pour permettre le mouvement de la volée sans frottement, en assurant une jonction assez rapprochée en position fermée.

§ 7. Manoeuvre des ponts basculants à axes fixes

La manoeuvre peut s'effectuer par action sur l'extrémité de la culasse ou directement sur l'axe. Le premier mode est ancien et n'est plus guère employé que pour la manoeuvre à main de ponts de petite portée. Dans ces conditions, le dispositif le plus simple consiste en un câble attaché à l'extrémité de la culasse et s'enroulant sur un treuil placé dans la chambre de culasse ou au-dessus de la culée, après avoir passé sur une poulie de renvoi. Il faut nécessairement un excès de poids favorisant la fermeture et l'ouverture ne peut être complète, afin que la fermeture par le poids propre soit encore possible en cas de vent contraire. Pour être indépendant du vent, il faudrait un câble sans fin et un treuil à tambour de friction. Ces planches montrent des dispositifs

anciens de manoeuvre par la culasse du pont d'Amsterdam et du Tower-Bridge au moyen de vis sans fin ou de secteur denté. On peut aussi employer un mécanisme à bielle et manivelle.

L'attaque directe de l'axe se fait actuellement de préférence par moteur électrique et train réducteur d'engrenages. On peut aussi employer un vérin hydraulique agissant sur une manivelle calée sur l'axe (Schellevbrug près de Rotterdam) § 8

Pour le calcul des axes et mécanismes, je me réfère au cours de barres mobiles.

§ 8. Dispositions du tablier des ponts basculants à axes fixes.

Généralement les longerons sont sous le tablier et à âme pleine ou en treillis, selon la portée; la membrure inférieure est retroussée. Cette disposition est favorable pour arc-bouter les deux travées en position fermée, elles travaillent alors comme arcs à trois rotules; les rotules de naissance étant indépendantes des axes de rotation. Dans ce cas, la butée de culasse est inutile, il suffit du verrouillage.

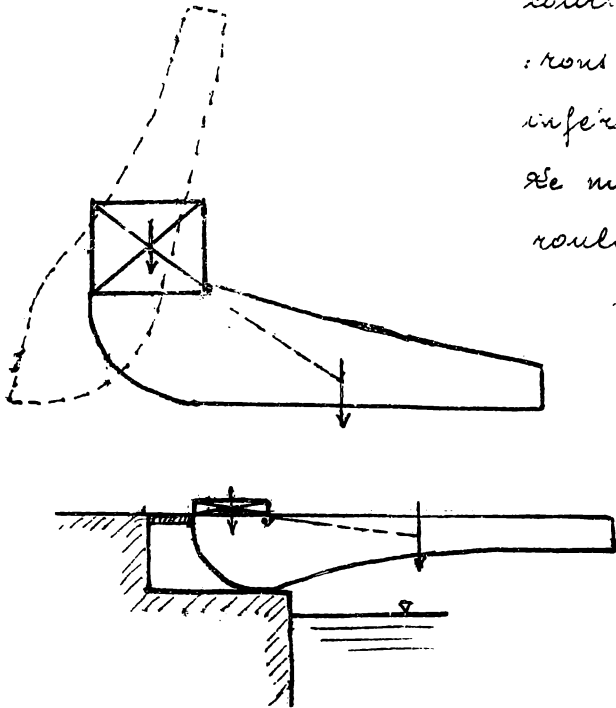
Une disposition moins fréquente, mais qui présente des avantages dans certains cas, consiste à employer des longerons en treillis au-dessus du tablier, la culasse est constituée par les bouts de ces longerons, dont les membrures inférieures sont courbées en forme de secteur circulaire et se meuvent avec les contrepois dans les chambres de culasses. La manoeuvre par la culasse est très favorable dans ce cas: les longerons de culasse sont pourvus d'une denture dans laquelle engreine un pignon d'entraînement. Il faut nécessairement une butée de culasse et un verrouillage de volée et de culasse. L'axe peut être dégagé en position fermée.

§ 9. Ponts basculants par roulement, système Scherzer

Le grand inconvénient des ponts basculants à axes fixes réside dans la disposition et le mouvement de la culasse sous le tablier, qui exige des chambres de culasse étanches. De nombreux dispositifs ont été étudiés

en vue de réduire ou supprimer cet inconvénient. Des ponts basculants à roulement du système Scherzer ont rencontré un grand succès par suite de la simplicité et de l'efficacité de leurs dispositions et de leur aspect satisfaisant.

En principe, le pont Scherzer comporte une volée et une culasse très courte portant des contrepoids. Les longerons de cette culasse présentent à la partie inférieure la forme de secteurs circulaires. Le mouvement de basculement se fait par roulement de ces secteurs sur un chemin de roulement horizontal établi sur les culées ou sur les travées fixes adjacentes. Le mouvement de rotation s'accompagne donc d'une translation horizontale, le dégauchement complet de la passe exige donc une ouverture angulaire un peu moindre.

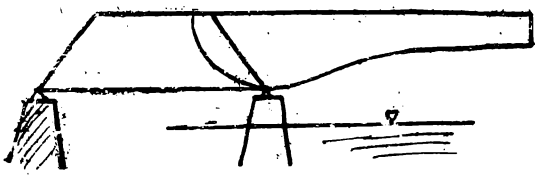


L'équilibrage complet exige que le centre de gravité se trouve au centre du secteur de roulement, dont le déplacement est horizontal. Le travail de manoeuvre ne sert alors qu'à vaincre les frottements. Mais comme dans les cas précédents, il est préférable d'avoir une légère insuffisance d'équilibrage.

Ces ponts se construisent souvent à simple volée; en position fermée ils sont simplement appuyés sur les 2 rives. Mais on les construit aussi à double volée avec verrouillage central. En position fermée, il y a appui fixe des volées sur les 2 piles ou culées et les extrémités des culasses heurtent contre des traverses ancrées en vue de supporter des réactions négatives. On estime en Amérique que ces ponts permettent une réduction de 12% de la portée pour une même passe, une réduction de poids de 24% et de contrepoids jusqu'à 45%. Ils permettent aussi de disposer un nombre quelconque de tabliers parallèles indépendants ou des ponts à tabliers très larges, ce qui est très avantageux

au voisinage des grandes gares de chemin de fer et dans les grandes villes. Ils peuvent également être b'air.

Les dispositions du tablier sont diverses. Lorsque la passe navigable est établie entre deux culées ou deux piles assez larges et que, d'une manière générale, il y a une différence de niveau de quelques mètres entre l'eau et le tablier, les poutres sont sous voies et généralement centrées, à âme pleine ou en treillis d'après la portée. Le chemin de roulement est au-dessus du niveau de l'eau; la culasse peut se voir à ciel ouvert si le niveau de l'eau est assez bas. Éventuellement, il faut une chambre de culasse étanche, mais très réduite par rapport à celle des ponts basculants à axes fixes. À cause de la translation de l'axe, le tablier mobile recouvre nécessairement une partie de la culasse. Le raccordement avec la voie fixe se fait comme dans les ponts basculants précédents. Pour les voies très larges, on peut multiplier les longerons sous voie, tous munis de leur secteur de roulement. Mais les secteurs extrêmes sont seuls munis, les organes de manœuvre étant nécessairement à l'extérieur.

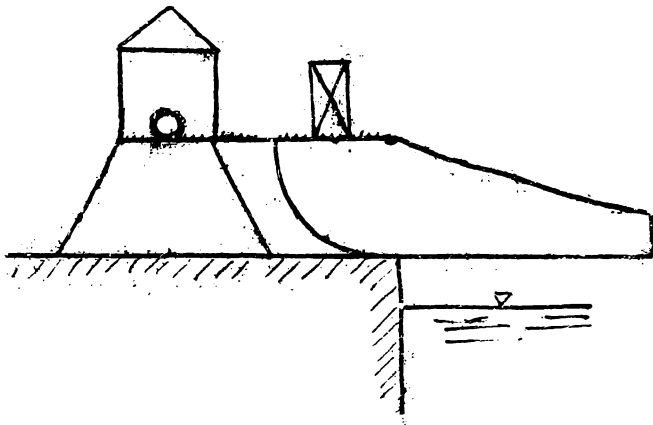


Ce dispositif pourrait aussi être employé avec des traverses d'approche fixes d'une largeur plus grande que le tablier mobile, dont les secteurs rouleraient à l'intérieur

des membrures inférieures des traverses fixes.

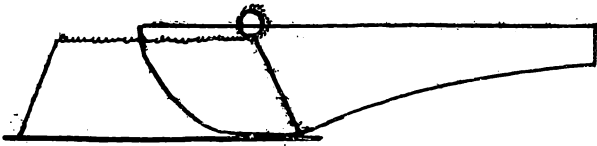
Une autre disposition comporte, au contraire, des longerons en treillis au-dessus du tablier, à membrure inférieure rectiligne se relevant en

secteur à la culasse. Le chemin de roulement est donc peu sous le niveau du tablier, dont la partie mobile s'arrête à l'extrémité de la voie. Si la hauteur de la poutre est assez grande, le contre-poids peut être fixe entre les longerons de culasse, il faut un



Ponts mobiles.

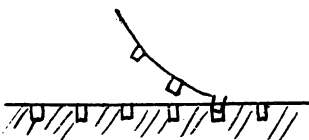
tirant d'air suffisant ($> 4,50$). Sans ce cas, la culasse se meut généralement dans l'intérieur d'une travée d'approche à poutres très hautes ou bien d'un double portique métallique élevé sur la culée et portant la cabine de manoeuvre. Cette disposition peut être rendue satisfaisante pour l'aspect. Elle peut éventuellement permettre la butée de culasse. Une disposition beaucoup moins favorable en général consiste à établir de grands contrepois au-dessus des longerons de culasse. Ils peuvent se mouvoir alors à l'intérieur des travées d'approche si le tablier est à une seule volée et n'exige pas de butée de culasse.



§ 10. Manoeuvre du pont Scherzer - (1911/16)

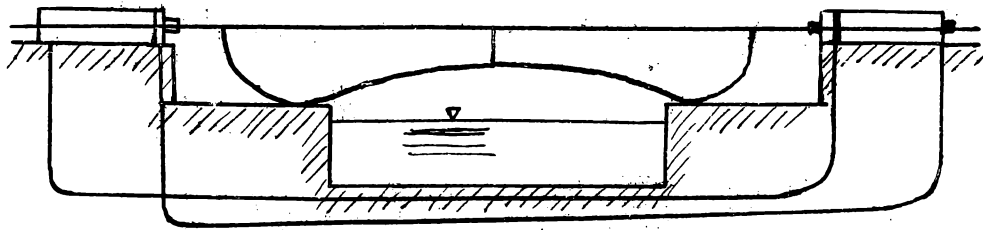
La manoeuvre la plus habituelle consiste à articuler au pont, au centre du secteur de roulement, une barre horizontale portant une crémaillère à laquelle un pignon communique un mouvement de translation horizontal. Le mécanisme est dans une cabine de manoeuvre surmontant le portique de culée ou la travée d'approche. Toutes les commandes de pont dans cette cabine, y compris le verrouillage. Un dispositif beaucoup moins recommandable consiste en une crémaillère fixe horizontale dans laquelle engreine un pignon moteur solidaire du pont et dont l'axe est confondu avec celui du secteur de roulement. Le moteur et les mécanismes sont fixés sur le pont et nécessairement sous le tablier, ce système ne convenant qu'à pour les tabliers à poutres sous voie.

Un point délicat de ces ponts, c'est le manque de guidage par l'axe, on peut craindre des déplacements latéraux ou obliques sous l'effet du vent. Pour l'éviter, on munit le secteur de saillies qui s'engagent dans des empreintes correspondantes du chemin de roulement. En outre,



d'après un dispositif inventé par l'ingénieur allemand Balg pour le pont Hansa à Stettin, dans le cas de travées doubles, on prolonge les bielles de manoeuvre par des tiges munies d'un

piston à double effet se déplaçant dans un cylindre hydraulique. Les 2 faces des 2 cylindres identiques sont réunies par des tuyaux passant



en siphon sous le fleuve. Ses connexions sont faites de telle sorte que l'eau refoulée dans

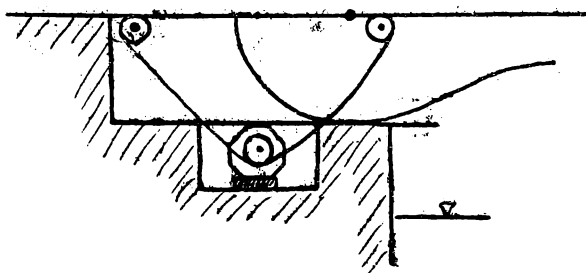
un cylindre pénètre dans l'autre cylindre; il y a donc équilibrage des efforts sur les 2 ponts et égalisation des courses. Si le vent notamment favorise l'ouverture d'une voilée en résistant sur l'autre, ces actions se compensent par l'accouplement hydraulique. L'ouverture et la fermeture sont ainsi simultanées et on peut sans inconvénient employer le ventouillage fixe par des doigts en saillie sur les longerons.

Pour les petits tabliers à une voilée on peut aussi employer une chaîne Galbe sans fin dont le brin horizontal est attaché au pont au centre du secteur. Elle passe sur des poulies de renvoi et reçoit son mouvement d'un moteur électrique avec réducteur situé dans une chambre pratiquée dans la culée.

§ 132. Autres types spéciaux de ponts basculants.

De nombreux types, souvent très ingénieux, ont été inventés dans le but de trouver un mode d'équilibrage n'exigeant pas, pour le mouvement de la culasse, d'espace important sous le tablier du pont.

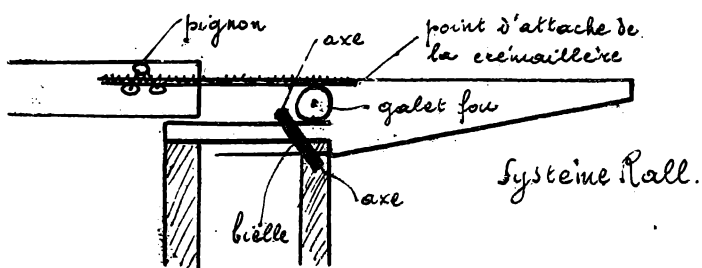
Le type Skall est dérivé du type Scherzer et du pont-levis roulant de Bergère. L'axe du pont porte à frottement doux deux roues extérieures



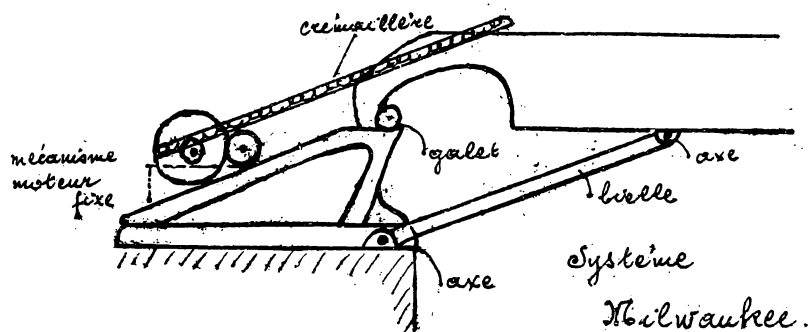
roulant sur un chemin de roulement horizontal. Le mouvement est communiqué par une bielle à crémaillère engrenée par un pignon moteur fixe ou par un pignon moteur

solidaire du pont engrenant dans une crémaillère fixe. En outre, pour déterminer complètement le mouvement de roulement, la culasse est reliée à la pile par une bielle à articulation fixe. Le mouvement

est donc déterminé par la trajectoire de deux fronts, l'une horizontale, l'autre circulaire. Il y a équilibrage presque total.

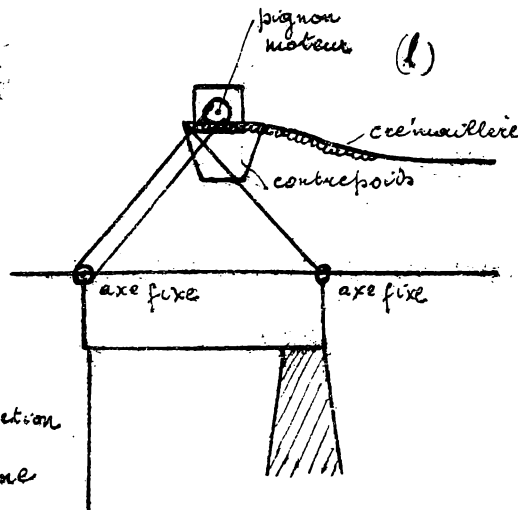
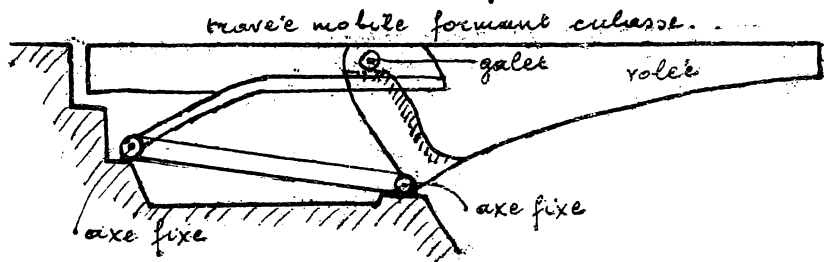


Dans le système du pont de Huron-street à Milwaukee, la volée est également articulée à une bielle pivotant d'autre part autour d'un axe fixe à la pile.



Les contrepoids sont disposés tout à fait à l'arrière de la volée qui ne possède pas d'axe, mais dont le longeron inférieur roule sur des galets fixes à la culée et montés sur roulements à rouleaux. Le longeron est profilé sur la longueur du roulement suivant un profil spécial tel que, dans le mouvement de roulement, le centre de gravité de l'ensemble se meut horizontalement, de sorte que le travail de soulèvement se borne à celui des résistances. On voit que nécessairement ce dispositif exige que la culasse descende pendant le mouvement d'ouverture. La manœuvre est commandée par crémaillère et pignon moteur fixe. Les systèmes suivants sont à axe fixe.

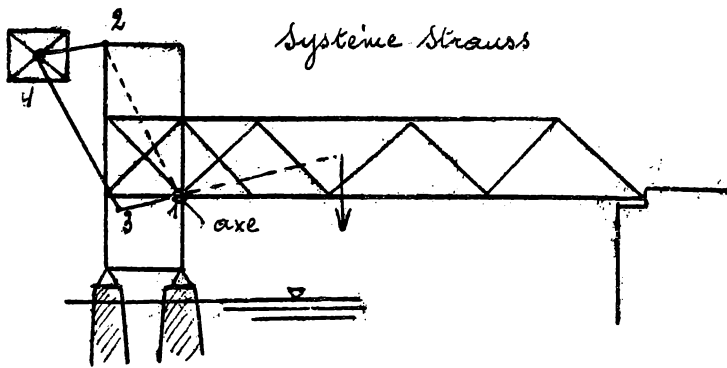
Système Page (a)



Dans le système Page, la culasse n'est que partiellement pas lestée mais elle reçoit l'action d'un contrepois articulé à l'extrémité d'une bielle pivotant autour d'un axe fixe à la culée. Pendant le mouvement d'ouverture, la situation relative de la culasse et de la bielle varie ;

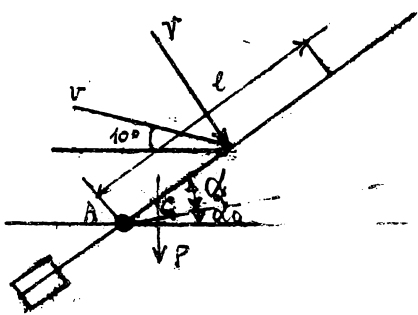
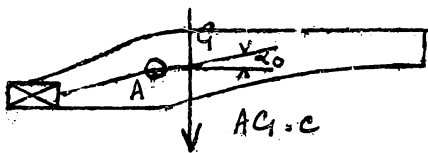
le contact s'effectue suivant une trajectoire profilée de telle sorte que l'action équilibrante du contrepoids varie de manière à assurer un équilibre constant. Cette idée a été appliquée d'une manière particulièrement ingénieuse au pont de Ashland Avenue à Chicago. La bielle à contrepoids est constituée par une travée mobile de rive reposant sur la culasse de la travée basculante à poutres sous voie. L'équilibre constant est ainsi assuré sans chambre de culasse sous le niveau de l'eau.

Sans le système Strauss, le même résultat est atteint en substituant à la culasse un parallélogramme articulé dont un sommet est l'axe fixe de rotation, un autre un point fixe de la culée, le troisième est invariablement lié au pont, le 4^e est libre et reçoit l'action d'un contrepoids suspendu à grande hauteur au-dessus du pont. L'équilibre est évidemment constant. Le mouvement peut être communiqué par l'axe, ou par secteur ou par bielle, notamment en agissant sur les côtés mobiles du parallélogramme. L'aspect des contrepoids est peu satisfaisant.



de rotation, un autre un point fixe de la culée, le troisième est invariablement lié au pont, le 4^e est libre et reçoit l'action d'un contrepoids suspendu à grande hauteur au-dessus du pont. L'équilibre est évidemment constant. Le mouvement peut être communiqué par l'axe, ou par secteur ou par bielle, notamment en agissant sur les côtés mobiles du parallélogramme. L'aspect des contrepoids est peu satisfaisant.

Malgré leur ingéniosité, on peut douter du succès de ces systèmes; les dispositions simples sont généralement les plus convenables. Je ne cite que pour mémoire les ponts oscillants, c'est-à-dire à levée incomplète; généralement faible et qui sont peu réparés.

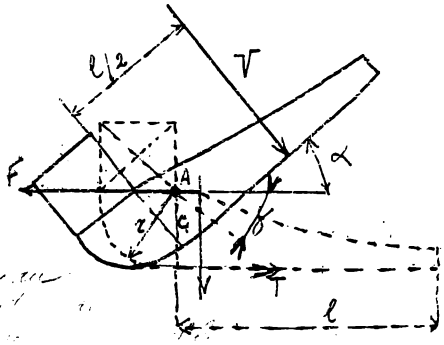


§ 12. Efforts de manoeuvre.

Le couple instantané de manoeuvre pour une volée à axe fixe, levée d'un angle α par rapport à l'horizontale est:

$$M = Pc \cos(\alpha + \alpha_0) + \frac{v l^2 b}{2} \sin^2(\alpha + 100) + [\bar{P} + \bar{V}] P l + \frac{P}{g} \frac{h}{c} \frac{dv}{dt}$$

V étant la pression du vent en kg/cm^2 , l sa longueur et b la largeur du tablier, P le poids total et c la distance du centre de gravité à l'axe, $[\bar{P} + \bar{V}]$ la grandeur scalaire de la résultante de P et V , r le rayon des tourillons et f le coefficient de frottement dans les paliers, enfin k le rayon de giration autour de l'axe.



Cet effort est variable, il faut en tracer le diagramme en fonction de α ou de t . On fera un calcul approché de $\frac{P}{g} k^2$. L'expression précédente suppose que la manoeuvre se fasse par déroulement d'un couple sur l'axe. Si le moment résulte d'une force F agissant avec un bras de levier r , il faut substituer $F r$ à μ et $[\bar{P} + \bar{V} + \bar{F}]$ à $[\bar{P} + \bar{V}]$ pour le frottement des paliers. On a $[\bar{P} + \bar{V}] = \sqrt{(P + V \cos \alpha)^2 + V^2 \sin^2 \alpha}$ en admettant que l'axe de rotation du vent soit normale au tablier.

Pour un pont roulant, Scherzer on a les relations:

$$T r = P c \cos(\alpha - \gamma) + V l/2 + \frac{P}{g} k^2 \frac{d\omega}{dt} + (P + V \cos \alpha) f_1 r + F f r + \frac{P}{g} \frac{d^2 \theta}{dt^2} r$$

$$F = T + V \sin \alpha$$

$$\text{d'où } F = \frac{P c \cos(\alpha - \gamma) + V d + \frac{P}{g} k^2 \frac{d\omega}{dt}}{r (1 - f \frac{P}{c})} + (P + V \cos \alpha) \frac{f_1}{1 - f \frac{P}{c}}$$

F étant l'effort exercé par la balle au centre du secteur

T l'effet tangentiel à la périphérie du secteur

f_1 le coefficient de roulement.

$l/2$ le bras de levier de V par rapport au centre du secteur.

$d = \frac{l}{2} + r \sin \alpha$ " " " " " " instantane de rotation, qui est le point de contact du secteur et du chemin de roulement.

r le rayon du secteur.

Cette formule permet de tracer un diagramme des efforts en fonction des diverses positions d'ouverture. Connaissant d'autre part les caractéristiques du moteur et donc les efforts disponibles sur l'axe ou à la bielle en fonction de la vitesse de rotation, donc du temps, on peut déterminer les accélérations et étudier graphiquement le régime variable, comme pour les ponts levants.

Chapitre III

Ponts tournants

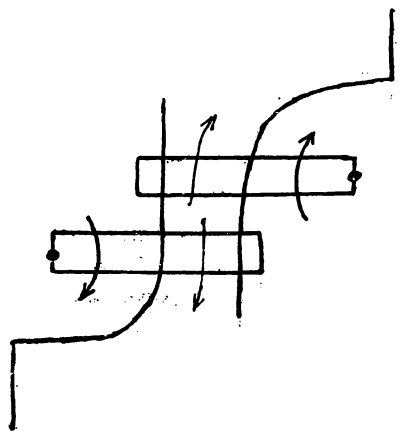
Généralités et construction

§ 1. Caractères généraux des ponts tournants

Les ponts tournants dégagent les passes navigables par rotation autour d'un axe vertical. En position ouvertes, ils sont posés // à l'axe de la voie navigable, sur laquelle ils empiètent de toute leur largeur. C'est un très grand inconvénient pour les voies navigables de faible largeur. Un autre, de même nature, consiste dans la nécessité d'une culasse équilibrant exactement la volée. Il en résulte que le tablier a nécessairement une longueur sensiblement supérieure à celle de la volée et presque double. Les ponts tournants sont donc très encombrants ; pour les passes navigables étroites, les types de ponts mobiles précédemment étudiés conviennent mieux. Cet inconvénient n'existe pas pour les voies navigables très larges. La grande longueur du tablier mobile réduit d'autant celle des travées d'approche fixes. Le type le plus avantageux est dans ce cas le pont tournant symétrique à deux volées s'équilibrant mutuellement. Il couvre deux passes navigables d'égale largeur, une pour chaque sens de navigation. Lorsque l'on désire une passe centrale particulièrement large comme dans les grands ports maritimes ou sur les fleuves à chenal unique, on peut construire un double pont tournant symétrique (Wilhelmshafen) ou dissymétrique (Kübeck) ce pont dissymétrique simple ne couvre qu'une passe navigable.

En principe, l'équilibrage doit être exact et le centre de gravité total doit être sur l'axe vertical de rotation. La culasse des ponts dissymétriques doit donc être lestée. Il en résulte qu'à volée égale, le pont tournant

symétrique est plus léger. Mais le rayon de giration en est plus grand et les effets d'inertie en sont plus considérables. On a construit des ponts tournants à une seule voûte sans culasse, l'axe de rotation étant à une extrémité du pont. La stabilité du pont ouvert peut être alors



assurée par des galets roulant sur un chemin de roulement circulaire disposé sous le tablier tournant et qui réduit donc la largeur de la passe navigable. Un dispositif plus avantageux à ce point de vue consiste à supporter l'autre extrémité du tablier sur un flotteur. En position fermée, ces ponts reposent à leurs extrémités opposées à l'axe de rotation sur des appuis

fixes réglables qui supportent tous les effets des charges mobiles et une faible partie du poids mort.

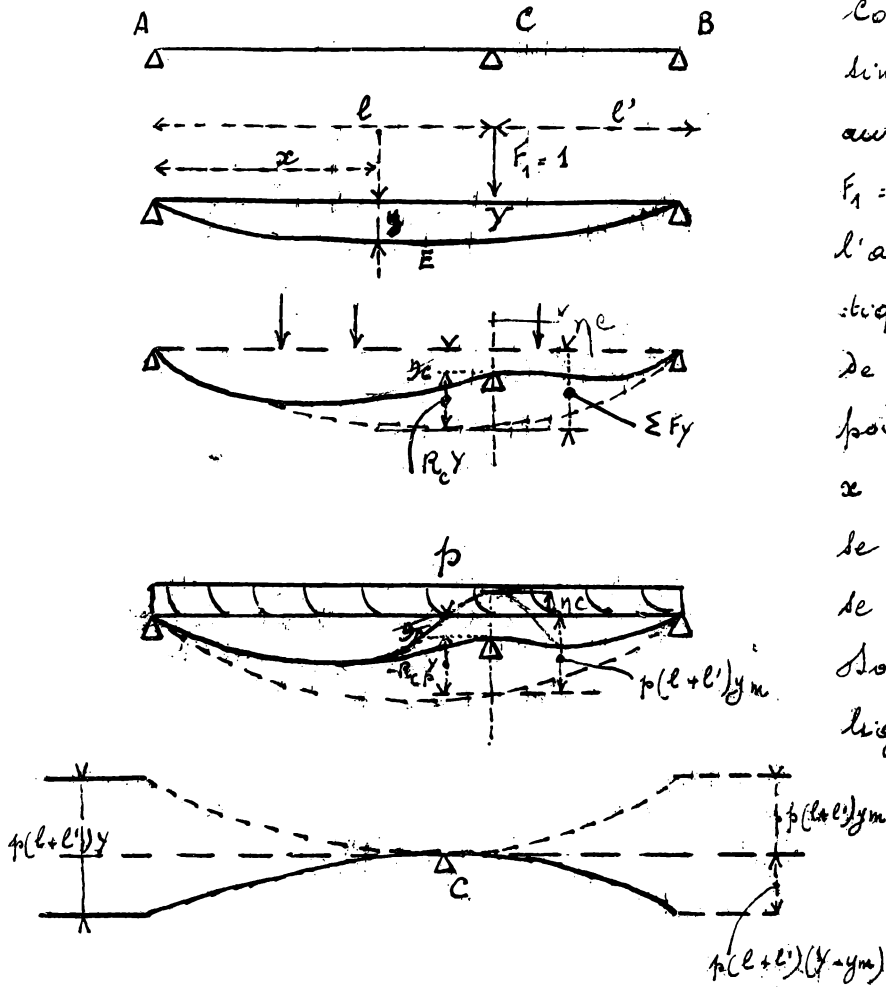
Les ponts tournants sous culasses sont employés notamment lorsque l'on établit deux tabliers mobiles voisins, par exemple pour une ligne de chemin de fer à double voie. On peut aussi rendre la rotation des deux tabliers indépendante, les sens d'ouverture étant inversés. Ils permettent aussi de doubler un pont tournant existant, l'ouverture étant simultanée dans le même sens.

L'axe de rotation est généralement disposé dans l'axe longitudinal du pont, par raison d'équilibre.

§ 2. Stabilité des ponts tournants.

En position ouverte, les ponts tournants sont en principe des poutres en équilibre sur un appui. Le plus souvent, pour augmenter la stabilité de cet équilibre, on ajoute des galets d'appui, on a donc ainsi deux appuis très rapprochés. La voûte et la culasse se calculent comme des encorbellements, les moments sont maxima au droit des appuis. La seule sollicitation est d'ailleurs celle du poids propre.

En position fermée, les tabliers tournants simples constituent des poutres sur trois appuis. L'étude de ce système hyperstatique est très simple par le th. de Maxwell.



Considérons le système comme simplement appuyé en A et B aux extrémités et une force $F_1 = 1$ agissant au droit de l'appui intermédiaire. L'élasticité est E . D'après le th. de Baxwell, la flèche y en un point quelconque d'abscisse x est égale à la flèche qui se produit en C lorsque $F_1 = 1$ se trouve au point d'abscisse x . Donc, l'élastique E est la ligne d'influence de la flèche y en C. Soit Y l'ordonnée au point C et supposons que les 3 appuis soient de niveau. L'effet du 3^e

appui, qui donne une réaction R_c est donc d'annuler en toutes circonstances la flèche y . Donc $\sum Fy - R_c Y = 0$

$$R_c = \frac{\sum Fy}{Y}$$

Donc l'élastique E est, à une échelle convenable, la ligne d'influence de R_c . R_c est donc connu et la détermination de tous les autres éléments du problème en découle. Si les trois appuis ne sont pas de niveau et qu'il existe une dénivellation D_c de C par rapport à AB, on a :

$$\sum Fy - D_c = R_c Y = 0 \quad \text{d'où} \quad R_c = \frac{\sum Fy - D_c}{Y} = R_{cs} + R_{cd}$$

Donc, on doit ajouter algébriquement à la réaction due aux charges une réaction de dénivellation. Les flèches y et Y se comptent positivement dans le sens positif des forces correspondantes. Observons que l'élastique spécifique E permet de déterminer la flèche en C du pont sur 2 appuis extrêmes sous l'effet du poids propre. Si nous le supposons uniformément réparti, c'est l'ordonnée moyenne y_m de l'élastique multipliée par

$p(l+l')$, poids total du pont. Donc la réaction due au poids mort est

$$R_c p = p(l+l') \frac{y_m}{Y}$$

Si nous supposons qu'agisse en C une réaction égale au poids total $p(l+l')$, les réactions sur les appuis extrêmes deviennent nulles, la sollicitation est celle du pont ouvert. La flèche de C par rapport à AB, égale et opposée à celle de A et B par rapport à C, est,

$$y_c = y_A = -y_B = -p(l+l') Y + p(l+l') y_m = -p(l+l') (Y - y_m)$$

Les réactions correspondantes sont nulles en A et B.

Lorsque la pièce sur 2 appuis reçoit en C une action F, il en résulte une flèche correspondante $y_c = FY$ par rapport à AB. Inversement, la réaction en C correspondant à une flèche y par rapport à AB est

$R_{cd} = \frac{-Dc}{Y}$. Les réactions correspondantes en A et B sont :

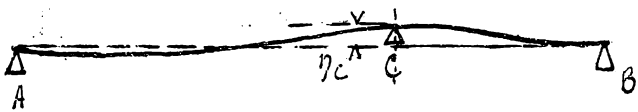
$$R_{Ad} = \frac{Fl'}{l+l'} = \frac{Dc}{Y} \frac{l'}{l+l'}$$

$$R_{Bd} = \frac{Dc}{Y} \frac{l}{l+l'}$$

Inversement, à l'unité de force en A correspond une dénivellation spécifique de C par rapport à AB égale à $Y \frac{l+l'}{l}$. Pour le pont B, c'est $Y \frac{l+l'}{l'}$.

Cette détermination des flèches spécifiques ou relatives aux appuis est très importante pour le calage des ponts tournants. En position ouverte, on voit que A et B sont en dessous de C. Après la fermeture, il faut que

A et B viennent en contact avec des appuis fixes, généralement réglables. Lorsque le contact est



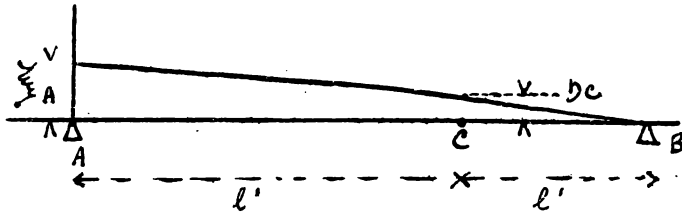
stabilisé, il existe en général une certaine dénivellation y_c entre C et AB. Il en résulte une réaction partielle correspondante $R_{cd} = \frac{-Dc}{Y}$, les y_c se comptant positivement comme les ordonnées d'influence par rapport à AB.

En A et B, des réactions partielles correspondantes se développent :

$$R_{Ad} = \frac{Dc l'}{Y(l+l')} , \quad R_{Bd} = \frac{Dc}{Y} \frac{l}{l+l'}$$

Quand on soulève un appui tel que A d'une quantité verticale y_A ,

le déplacement relatif par rapport à C de AB est $\eta_c = \frac{\sum A l'}{l+l'}$ et les



réactions correspondantes en A, B et C sont données par les formules précédentes.

Donc :

$$R_{AS} = \frac{\sum A l'^2}{Y(l+l')^2}, \quad R_{BS} = \frac{\sum A ll'}{Y(l+l')^2}, \quad R_{CS} = \frac{-\sum A l'}{Y(l+l')}$$

On obtient des formules analogues dans le cas d'un soulèvement ξ_B de B et donc, dans le cas d'un soulèvement des 2 appuis,

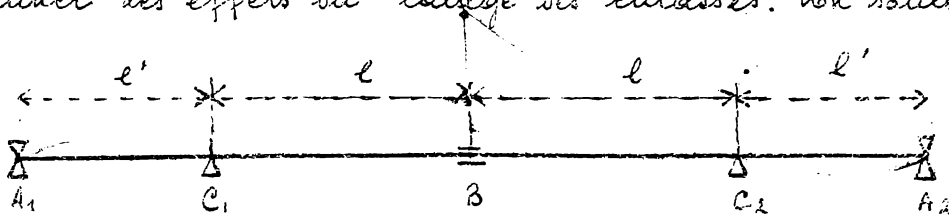
$$R_{AS} = \frac{l'}{Y(l+l')^2} (\sum A l + \sum B l) \quad R_{BS} = \frac{l}{Y(l+l')^2} (\sum A l' + \sum B l'), \quad R_{CS} = \frac{-(\sum A l' + \sum B l)}{Y(l+l')}$$

Ces formules permettent donc de calculer les efforts qu'il faut exercer pour un soulèvement ou un abaissement défini d'un appui et, inversement, quelle dénivellation d'appui correspond à un effort supporté. Tous les problèmes de stabilité et de déformation d'un pont tournant simple sont donc résolus grâce à l'élastique E.

Les formules se simplifient beaucoup pour les ponts tournants symétriques, dans lesquels $l = l'$. On a donc :

$$R_{AS} = R_{BS} = \frac{\eta_c Y}{2} \quad R_{CS} = -\frac{\eta_c Y}{2} \quad \eta_c = \left(\frac{\sum A + \sum B}{2} \right)$$

Les ponts tournants doubles sont en position ouverte dans la même situation que les ponts simples. En position fermée, les 2 volets adjacents sont verrouillés et les 2 extrémités de culasses sont calées. Le système est hyperstatique et identique à celui des ponts basculants à axes fixes et à double volet. La solution est donc la même. Mais il faut en outre examiner les effets du calage des culasses. Un soulèvement ξ_1 de



A_1 , entraîne un abaissement $\xi_1 \frac{l}{2}$ de B. De même un soulèvement ξ_2 de A_2 donne lieu à un abaissement $\xi_2 \frac{l}{2}$ de B. La réaction correspondante

de la partie de droite sur la partie de gauche est, suivant le sens positif des réactions :

$$R_s = \frac{\sum \xi_1 - \sum \xi_2}{2\gamma} \frac{l}{l'}, \quad \text{si } \sum \xi_1 > \sum \xi_2,$$

en admettant que les 2 ponts soient identiques. Les appuis A_1 et A_2 doivent être ancrés comme dans les ponts basculants, car ils doivent supporter des réactions négatives (de bas en haut). Il faut tenir compte des effets des températures inégales des membrures.

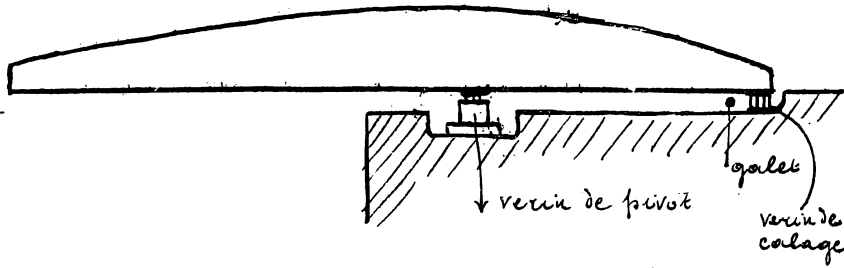
§ 3. Principe de manoeuvre des ponts tournants.

Le dispositif le plus simple consiste à utiliser comme appui central unique en toutes positions le pivot ou la couronne de galets de rotation. En position fermée, les appuis d'extrémité sont plus ou moins calés ou verrouillés. On peut calculer les réactions correspondantes, c'est-à-dire les efforts de calage et de verrouillage. Pour ouvrir le pont, on décale et déverrouille; quand les appuis sont dégagés, on fait tourner le pont qui ne repose que sur son pivot et ses galets de roulement.

L'inconvénient du système est que le pont repose toujours sur ses organes de rotation, qui subissent les effets des charges mobiles et du poids propre. Quant aux appuis d'extrémité, ils subissent les effets des charges mobiles, mais ceux du poids propre seulement jusqu'à concurrence des efforts de calage.

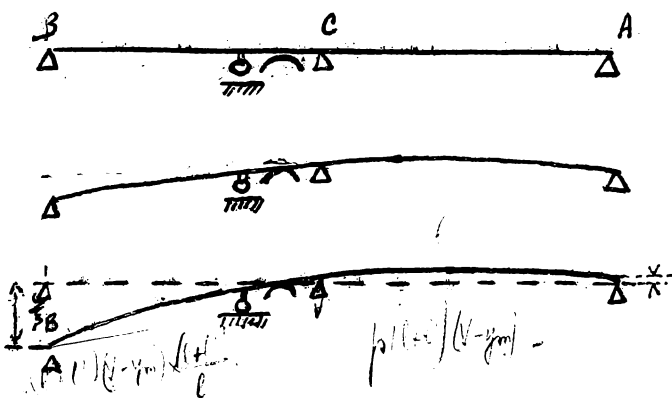
Un dispositif plus perfectionné est celui qui comporte le soulèvement du pivot qui est constitué par un plongeur cylindrique de presse hydraulique. Ce soulèvement est d'importance telle que le pont soit dégagé de ses appuis extrêmes, donc supérieur à $p(l+l')(Y-y_m)$ par rapport à AB. Le pont peut ensuite être tourné. Revenu en position de fermeture, le pivot est abaissé jusqu'à ce que les extrémités reposent sur leurs appuis et qu'en outre le pont soit venu en contact avec un appui central fixe qui, en position fermée, dégage le pivot de tout effort. Observons d'ailleurs que le pivot tourne sur un liquide, ce qui est favorable pour le frottement et la conservation. Mais l'inconvénient du système réside dans l'encombrement et la complication du grand vérin hydraulique à établir dans la pile centrale ainsi que dans la difficulté

de l'équilibrage par galets. Aussi combine-t-on avantageusement le soulèvement du pivot avec un décalage de culasse qui permet un équilibrage par galets de roulement.



(Pont du Bassin National à Marseille).

Mais le décalage de culasse rend superflu le soulèvement du pivot et permet la manoeuvre par basculement, qui comporte plusieurs phases.



En position fermée, le pont repose à ses deux extrémités et à proximité du pivot sur des appuis fixes, le pivot est soulevé légèrement.

Pour ouvrir, on décale la culasse qui possède un léger excès de poids, elle bascule autour de l'appui fixe

central jusqu'à ce que le pivot entre en contact avec la lentille. Elle continue à basculer autour de la lentille jusqu'à ce que l'extrémité de la voûte se dégage de son appui fixe. Peu après, des galets placés sous la culasse entrent en contact avec un chemin de roulement sur la face centrale et un léger décalage supplémentaire dégage complètement l'appui de culasse. Le pont ne repose plus que sur le pivot et les galets et peut être tourné. Revenu en position fermée, les opérations se recommencent en sens inverse. On cale la culasse, c'est-à-dire qu'on la soulève. Le pont bascule autour du pivot, les galets se soulèvent, l'extrémité de voûte entre en contact avec son appui, puis l'appui fixe central entre en charge et finalement la lentille se soulève et la position primitive est retrouvée.

Ce qui conditionne l'importance du basculement, c'est-à-dire du décalage de l'extrémité de culasse, c'est le complet soulèvement de l'appui fixe de voûte. Il correspond donc à une flèche $> \frac{p(l+l')(Y-y_m)}{6}$ de C par rapport à A B. L'abaissement est donc $\xi_B > \frac{p(l+l')^2(Y-y_m)}{6}$

l'effort de calage max correspondant est : $R_{B_2} = \frac{pl(Y-y_m)}{Y}$ et $R_{B_3} = \frac{pl'(Y-y_m)}{Y}$

L'importance du calage peut être diminuée si on le répartit sur les appuis.

alors :
$$\frac{\sum_B l + \sum_A l'}{l+l'} > p(l+l')(Y-y_m)$$

et les efforts de calage s'obtiennent par les formules connues, leurs valeurs finales sont d'ailleurs les mêmes que ci-dessus. R_c est alors égal à R_{cp} , R_{cd} étant nul.

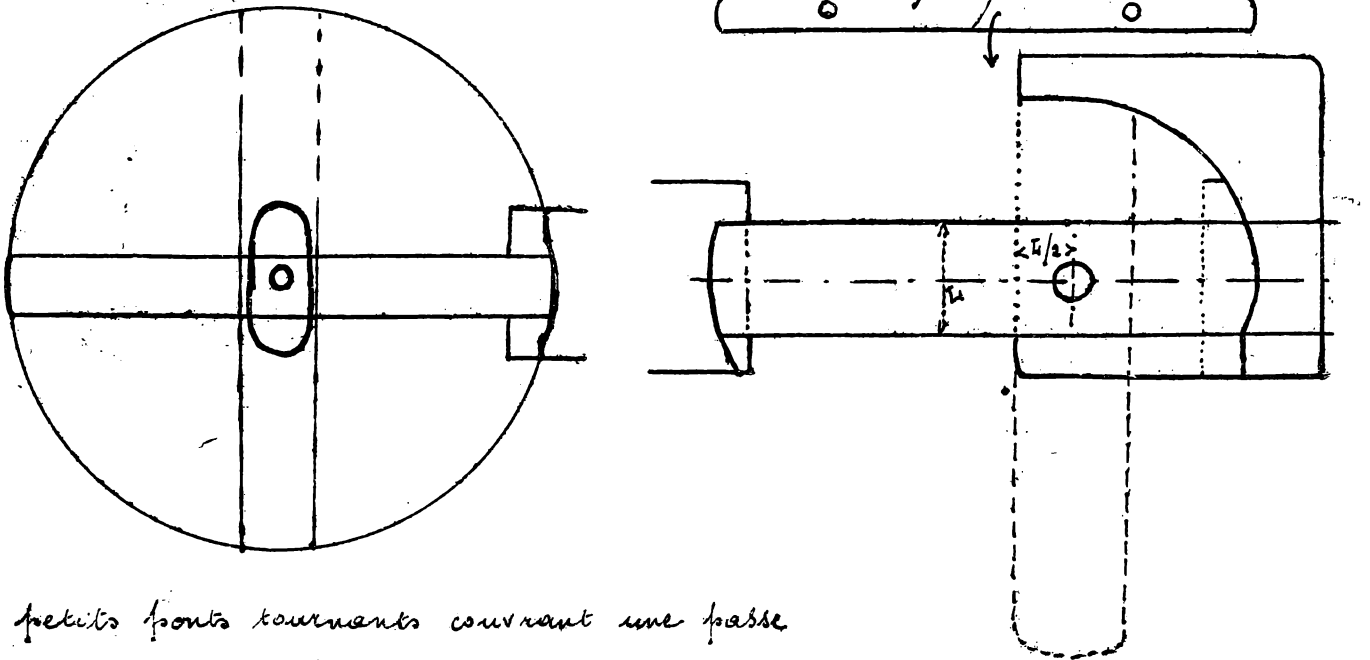
L'avantage du système réside dans un meilleur équilibrage, une plus grande simplicité mécanique et de moindres efforts de soulèvement. En effet, les réactions aux appuis extrêmes sont inférieures à celle de l'appui central; les efforts de calage sont donc inférieurs aux efforts de soulèvement du pivot. On peut d'ailleurs aussi prévoir un calage imparfait si l'appui fixe C est au-dessus de AB, pour autant qu'il n'en résulte pas de sollicitation défavorable des maîtresses poutres, ou, au contraire, un calage surabondant, pour améliorer la sollicitation des maîtresses poutres.

§4. Parties fixes des ponts tournants.

Les ponts tournants peuvent être adjacents à des travées d'approche fixes, cependant, par suite de la grande longueur du tablier, ils s'étendent souvent d'une rive à l'autre et comportent donc en principe deux culées et une pile intermédiaire. Si le pont tournant est double, il y a deux culées et deux piles. Dans le cas où il y a des travées d'approche fixes, les piles extrêmes des tabliers fixes jouent pour le pont tournant le même rôle que les culées et portent les mêmes organes; elles doivent généralement recevoir de ce fait des dimensions transversales plus fortes; dans ce qui suit elles seront assimilées aux culées.

Dans le cas plus général des grands ponts tournants, symétriques ou non, la pile de pivot est tout à fait indépendante des culées. Le pont peut tourner de 180°, et même de 360° s'il est symétrique. Le raccordement avec la culée se fait suivant un arc de cercle dont le centre est sur l'axe de rotation du pont dans ce cas, le garde-grève a la même forme. La fonction des volées d'un double pont tournant doit être oblique par rapport à l'axe du pont, pour permettre le dégageement des deux volées lors de

l'ouverture ; la rotation des deux ponts peut être de 90° seulement, même s'ils sont symétriques.



Les petits ponts tournants couvrant une passe navigable unique sont généralement disymétriques. On diminue le plus possible la longueur de la culasse pour réduire l'inconvénient du grand encombrement de cette culasse sur la rive. Il faut en effet lui ménager dans la culasse un espace permettant son mouvement de rotation. Pour le réduire et comme le pont est généralement disymétrique, la rotation est de 90° seulement. La jonction du pont à la chaussée peut être circulaire ou oblique, ce dernier dispositif convient notamment si le pont est biais. L'appareil de rotation est donc placé sur une culasse, l'extrémité de la culasse s'appuie en position fermée sur un muret élevé à l'extrémité de cette culasse ou indépendamment.

Les culasses et piles se calculent et se construisent comme pour les ponts ordinaires, compte tenu des réactions, calculées comme il a été dit précédemment, et de l'espace nécessaire pour la disposition des organes spéciaux qui seront étudiés ci-après.

En position ouverte, le tablier est parallèle à l'axe de la pile centrale, qu'il recouvre en débordant vers l'aval et vers l'amont. Pour éviter les abordages et les fausses manœuvres, on fait précéder et suivre cette

de ducs d'Albe ou d'estacades ayant pour but de protéger le pont en position ouverte normale contre toute collision. Mais il faut donc que le pont en position ouverte se trouve bien dans le périmètre de son estacade de protection, c'est-à-dire soit tourné de l'angle voulu (p. ex. 90° si le pont est droit). A cet effet on dispose parfois des heurtoirs et appuis de fin d'ouverture sur les piles ou sur les estacades.

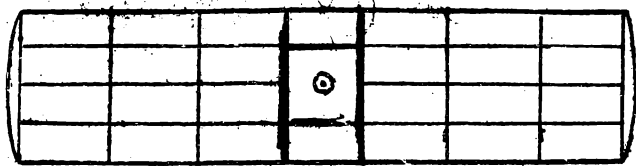


Dans le cas des petits ponts tournants dont le pivot est sur la culée, le pont doit être tout entier au-dessus du terre-plein en position ouverte, donc le pivot doit être en arrière du parement de la culée d'une quantité supérieure à la $\frac{1}{2}$ largeur du tablier. Donc la longueur totale du tablier est égale à la largeur de la passe navigable, plus $\frac{1}{2}$ largeur de tablier plus la longueur de la culée.

L'encombrement de ces ponts est donc très grand sur le terre-plein; la voûte demande une estacade. Malgré ces inconvénients, les petits ponts tournants ont eu du succès pendant longtemps à cause de leur grande facilité de manœuvre. Les ponts levés leur sont cependant supérieurs.

§ 5. Dispositions du tablier et de la charpente.

Les petits ponts sont généralement à tablier supérieur et à poutres à âme pleine. Il y a deux maîtresses poutres réunies par des traverses prolongées en encorbellement sous les trottoirs. Les traverses extrêmes



sont droites, les abouts du tablier sont conformés spécialement et bordés de garde-prises à transmission des charges au dispositif

de rotation se fait par une charpente spéciale appelée chevêtre, qui est solidaire de deux fortes entretoises, qui reçoivent les charges des maîtresses poutres. Il y a intérêt à augmenter la rigidité des maîtresses-poutres et des traverses centrales autant que le permet la hauteur disponible. Les ponts de plus grande portée peuvent avoir le tablier supérieur si la



hauteur libre le permet. Ses maîtresses poutres sont disposées comme dans le cas précédent et elles sont à âme pleine ou en treillis selon la portée. La membrure inférieure est généralement courbe, soit parabolique, ou similaire, soit disposée suivant deux segments de cycloïde à point de rebroussement au droit de l'axe de rotation pour les ponts symétriques. La culasse des ponts dissymétriques est souvent de hauteur constante. La chevêtre est également fixée à des traverses très rigides. Pour le reste de la charpente, notamment les contreventements, les dispositions sont les mêmes que dans un pont métallique fixe. Le contreventement doit toutefois reporter les actions du vent sur les trois appuis ; il faut donc trois portiques en cas de contreventement supérieur. Souvent la hauteur disponible au dessus de l'eau est faible ; on établit le tablier en position inférieure ou moyenne. Les poutres sont en garde corps ou, plus fréquemment,



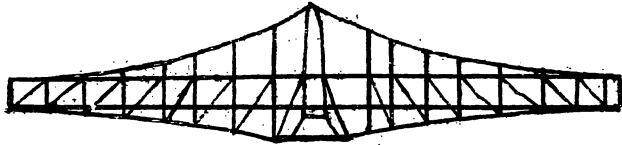
les trottoirs sont en encorbellement. Ses maîtresses poutres sont en treillis à membrure supérieure courbe. Parfois les deux membrures sont courbes, surtout dans les ponts symétriques. La forme parabolique ou la forme en double segment de chaînette de la membrure supérieure sont les plus répandues. La dernière, donne l'aspect le plus gracieux et, combinée avec la forme similaire mais opposée de la membrure inférieure, permet d'avoir des maîtresses poutres d'une très grande rigidité, ce qui est très avantageux. Les traverses de chevêtre peuvent aussi être hautes et rigides et s'assembler aisément aux maîtresses poutres.

Un dispositif particulier a été adopté pour les maîtresses-poutres du double pont tournant de Wilhelmshafen. Ses poutres sont à trois membrures, les deux extrêmes courbées en V à angles opposés, l'intermédiaire droite au niveau du tablier. Les deux inférieures sont réunies par une triangulation ; la supérieure agit comme une chaîne de pont suspendu et n'est réunie à l'autre membrure que par des tirants. Le pont

est donc en somme formé d'un pont suspendu symétrique, par rapport à un portique central renforcé par une poutre de rigidité. Ce système est hyperstatique.

Pour ce qui est des dispositions des voies sur les tabliers, tous les dispositifs applicables aux ponts fixes le sont en principe aux ponts tournants, pour lesquels la recherche de la légèreté est moins importante que pour les ponts à soulèvement. On peut avoir des tabliers pour divers genres de circulation accolés ou superposés.

La disposition du tablier est importante au point de vue de l'effet des températures. Le tablier inférieur laisse la membrure supérieure et le remplissage exposés aux rayons solaires ou à la neige et la glace, tandis qu'il protège les membrures inférieures des variations thermiques. Il en résulte des dilatations inégales qui donnent lieu à des



flexions des maîtresses poutres,

dont il faut tenir compte dans leur calcul et celui des efforts de calage.

Si le tablier est supérieur, il protège généralement une maîtresse poutre du soleil et des variations thermiques, l'autre étant exposée. Il en peut résulter des flexions transversales, qui sont gênantes notamment pour les ponts de chemin de fer, parce que les rails du tablier mobile et de la voie fixe ne viennent plus en coïncidence. Dans les ponts du canal de Kiel exposés à cet inconvénient, on a établi les voies aux extrémités du pont tournant sur un tablier pivotant, de sorte qu'ils raccordent la voie fixe et celle du tablier sous l'angle maximum des aiguilles.

Chapitre IV

Ponts tournants

Mécanismes et manoeuvre.

§ 1. Pivots et chevêtres.

Le pivot constitue un des organes principaux et des plus délicats des ponts tournants lorsque les charges deviennent importantes. Le diamètre des surfaces de contact dépend de la charge et des matériaux. En réduisant le ϕ , on réduit le bras du levier du couple résistant du frottement, mais on augmente d'une manière plus considérable la pression unitaire. Au-delà d'une certaine limite, le graissage devient difficile, le coefficient de frottement augmente ainsi que l'usure. Il peut se produire éventuellement des grippages sous les très lourdes charges.

Il faut des surfaces de contact très dures et bien rectifiées et polies. Un graissage est toujours désirable, mais n'est effectif que si la pression n'est pas trop forte. Il n'est pas possible cependant dans les ponts tournants de respecter les limites de pression spécifique des pivots des machines. Il est avantageux de rendre les parties en contact amovibles, le pivot comporte ainsi deux lentilles inférieure et supérieure. La première repose sur le support ou bâti du pivot; la seconde supporte le chapeau sur lequel repose la chevêtre du pont.

Dans les petits ponts peu chargés, il arrive que la lentille inférieure n'existe pas. Le bâti du pivot, qui affecte parfois la forme d'une cloche de fonte, supporte directement sur son sommet, spécialement profilé, la lentille supérieure. Ce dispositif est cependant irréaliste et doit être rejeté. De même, on abandonne les lentilles en fonte, pour

lesquelles on ne peut qu'admettre des pressions supérieures à 100 kg/cm^2 . Le dispositif le plus courant actuellement consiste à employer deux métaux durs différents, généralement du bronze phosphoreux dur pour la lentille inférieure et de l'acier dur trempé pour la lentille supérieure. On peut admettre dans ces conditions 300 kg/cm^2 en mouvement en toute sécurité, généralement davantage.

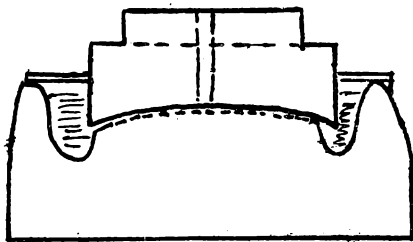
Dans les ponts français, avec des lentilles bien rodées à base d'huile de ricin, on a admis jusque 1000 kg/cm^2 sur la surface de contact de lentilles en acier et bronze durs. Le ϕ total est double de diamètre de contact. (pression diamétrale moyenne $1/4$ pression effective = 250 kg/cm^2)

La technique de la concentration dont les progrès récents sont considérables, semble devoir modifier l'état de la question par des lentilles durcies superficiellement.

Les lentilles sont généralement convexes-concaves. Souvent on donne une courbure légèrement plus forte à la lentille convexe, mais la surface de contact est réduite et il peut se produire une usure localisée. Il semble avantageux de réduire la plus possible la différence des rayons et de disposer la lentille convexe en-dessous.

On peut aussi employer des lentilles planes^{DS} mais il faut alors une rotule entre la lentille et le chapeau; d'ailleurs ces lentilles supportent moins bien les excentricités et les efforts latéraux et ne sont pas recommandables.

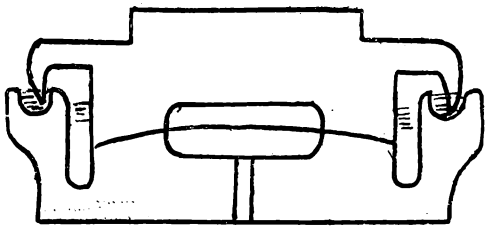
Le graissage peut se faire à bain d'huile^{21 I.P.A.} en donnant à la lentille inférieure une forme de cuvette ou en la logeant dans une cuvette.



Il semble plus efficace de graisser par le centre de la lentille sous une certaine pression, qui oblige l'huile à s'écouler entre les surfaces de contact. Dans ces deux cas on établit des pattes d'araignées dans une

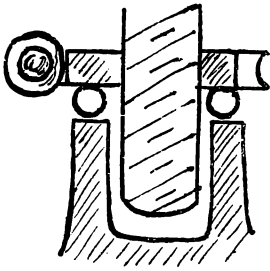
des lentilles, pour que le mouvement donne lieu à un graissage des surfaces par adhérence. Enfin on a parfois interposé des rouleaux entre les lentilles. Ces dispositifs ont été remarquablement appliqués dans les

grands ponts tournants du canal de Gand à Terneuzen. La pression de l'eau introduite par la lentille inférieure est de 250 Atm. Cette pression



agit sur une surface assez grande de la lentille supérieure et soulage de moitié le poids à supporter par les lentilles qui restent donc en contact. Sous l'effet de la forte pression, il y a aussi grais-

sage de ces surfaces, mais sans pattes d'araignée. La cuvette dans laquelle se trouve la lentille est fermée à joint hydraulique; l'huile est récupérée et filtrée. En position de fermeture du pont, ces pivots peuvent être déchargés par basculement et contact avec des appuis fixes; il y a alors un léger jeu entre les lentilles, qui est favorable au graissage.



Il existe des pivots à soulèvement. Un type exceptionnel et ingénieux est celui du pivot à vis du pont sur le canal Grand¹²⁶ à Terneuzen. Le pivot proprement dit est constitué par une vis irrévocable traversant un énorme écrou reposant sur une couronne horizontale de billes. Cet écrou porte

une couronne dentée attaquée par une vis sans fin. Le pont étant sur les appuis, la rotation de l'écrou provoque d'abord le soulèvement, jusqu'à ce que le frottement des appuis devienne inférieur à celui de la vis. A partir de ce point, le pont se met à tourner et vient heurter contre un arrêt en position d'ouverture. La rotation de l'écrou ajoute encore un léger soulèvement afin de permettre le passage au dessus des appuis fixes à la fermeture. La rotation en sens inverse produit d'abord la fermeture puis la descente sur les appuis, grâce à un verin de fermeture. Il y a aussi des pivots à soulèvement vertical par action multipliée de leviers actionnés par un treuil: ce système ne convient que pour les faibles charges, mais peut être équilibré. Le type le plus courant comporte un verin hydraulique à eau glycerinée, à glycérine ou à huile. Le soulèvement peut être de quelques

millimètres seulement, comme au pont rail de Capelle-au-Bois. Il a simplement pour objet d'assurer la rotation du pont sur une surface lisse à faible frottement, mais il est incapable d'assurer le décalage aux extrémités, qui ne peut se faire par basculement que si le pont repose sur le pivot par l'intermédiaire d'une rotule, à cause du joint étanche au pot de presse. Il faut donc des appareils spéciaux de calage aux extrémités du pont. Il y aurait intérêt cependant à avoir un soulèvement suffisant pour qu'en position fermée, le pont repose sur un appui à rotule intermédiaire et non sur le pivot.

On peut assurer par vérin hydraulique un soulèvement assez considérable, de quelques centimètres (15 cm. au pont de Eacken), de sorte que le soulèvement assure en même temps le décalage, l'abaissement, le calage et le repos sur l'appui central sans autre opération. Ce système est évidemment très simple et excellent au point de vue de la rotation, mais il exige un travail considérable de soulèvement de tout le pont, tandis que les travaux de calage aux extrémités sont beaucoup moindres. Il est intéressant de récupérer le plus possible le travail de descente ce qui peut se faire par des mouflages soulevant des contrepois assez considérables, ou des leviers réalisant le même effet, ou des accumulateurs hydrauliques, dont les fuites dissipent cependant une partie de l'énergie récupérée.

On a aussi établi des pivots sur des flotteurs cylindriques flottant dans une cuve cylindrique.

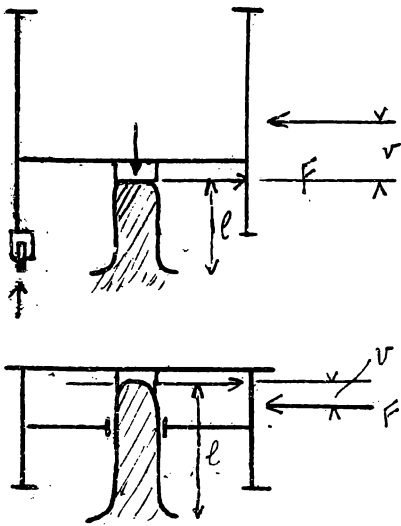
Quel que soit le système, le pivot supporte généralement un chapeau, fort plateau en acier coulé consolidé par des nervures et qui supporte le chevêtre, le plus souvent par suspension au moyen de forts boulons traversant le chapeau et les traverses de suspension du chevêtre, courtes et très robustes. Celles-ci peuvent dans les petits ponts être assemblées directement aux entretoises centrales de chevêtre, sinon par des longrines. Ses pièces et les assemblages du chevêtre doivent être particulièrement robustes et rigides.

En vue des actions latérales, notamment du vent, qui peuvent faire

osciller le pont, il faut que le chevêtre avec le chapeau puissent avoir de légers déplacements angulaires par rapport à l'axe vertical du pivot, afin de réduire l'effet des actions latérales sur le pivot.

§ 2. Calcul des éléments du pivot et du chapeau

Nous avons vu plus haut comment on en détermine le diamètre et la forme. Le bâti de support supporte la même charge ; il doit en outre subir les efforts latéraux du vent. Dans le cas de grands ponts à tablier inférieur ou bas, la résultante des actions du vent passe au-dessus du pivot et donne avec la réaction latérale sur le pivot un couple qui est équilibré par le couple de la réaction des galets de roulement et du pivot.



Si le pivot subit une réaction horizontale F et un accroissement de réaction verticale ; le moment dans la base du bâti est $F \cdot l$. Si le tablier est supérieur, le moment du vent est en sens inverse et de sens contraire au moment de la réaction horizontale par rapport à la base du bâti. Il y a donc intérêt à reporter le moment du vent par rapport à la

tête du pivot sur le bâti par l'action du pivot, le moment sur la base du bâti devient alors :

$$M = F (l - v).$$

l étant la hauteur du bâti avec son pivot.

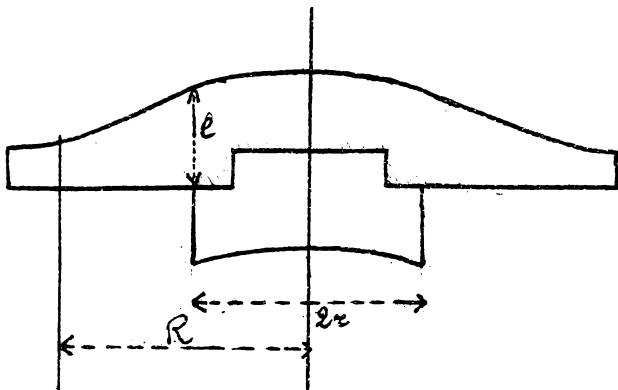
v la distance verticale à laquelle la résultante du vent passe sous la tête du pivot. Le chapeau subit une pression sur la surface de contact avec la dentelle supérieure qui est généralement encastree, c'est

$$\sigma_1 = \frac{P}{\pi r^2}$$

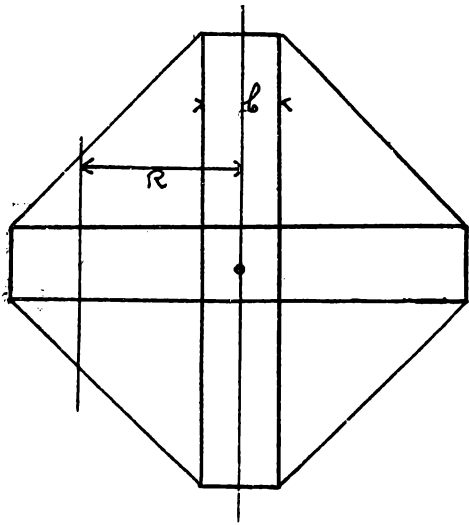
Ensuite, elle subit un cisaillement suivant une surface cylindrique

$$\tau = \frac{P}{2 \pi r e}$$

e étant l'épaisseur du chapeau.



Enfin il y a flexion. Supposons le chapeau circulaire et supposons que les boulons soient disposés suivant un cercle de rayon R . Le moment de flexion est $P(R - r)$ et dans la même section cylindrique, la fatigue de flexion est approximativement



$$\sigma_2 = \frac{P(R - r)}{\frac{2 \pi r \times e^2}{6}} = \frac{P(R - r)}{r e^2} \text{ env. } 1$$

S'il n'y a que peu de boulons, on les dispose aux extrémités de nervures croisées que l'on calcule comme des consoles. Soit n le nombre de boulons, b la largeur d'une nervure et R la distance au centre, on a:

$$M = \frac{P}{n} \left(R - \frac{b}{2} \right) \text{ et } \sigma_2 = \frac{\frac{P}{n} \left(R - \frac{b}{2} \right)}{\frac{b e^2}{6}}$$

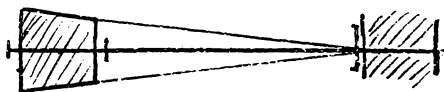
On prend généralement $b = 2r$ et $n = 4$, alors $\sigma_2 = \frac{3}{4} \frac{P(R - r)}{r e^2}$.

On voit donc que le chapeau est soumis à une sollicitation composée, donc il faut limiter la tension idéale:

$$\sigma' = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + 4\sigma^2}$$

§ 3. Couronnes de galets.

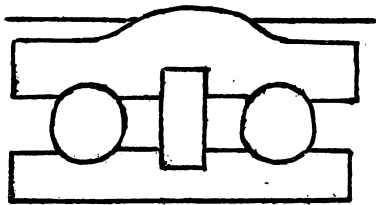
Dans certains ponts tournants, le pivot est remplacé par une couronne de galets. Le rayon du moment résistant est accru, mais le frottement de roulement est substitué au frottement de rotation du pivot, qui est beaucoup plus élevé. On peut donc donner un assez grand diamètre à la couronne sans résistances excessives. On peut avoir un grand nombre de galets, c'est-à-dire des pressions modérées sur les génératrices, seulement le réglage et l'égale répartition de ces pressions sont très difficiles. Des efforts latéraux augmentent d'ailleurs



la pression sur les galets opposés. On donne généralement aux galets une forme conique, de la sorte on peut espérer réaliser par jeu latéral une meilleure répartition des pressions,

, même sous l'effet de charges latérales. Mais les galets subissent alors alors des poussées horizontales et il est nécessaire de les monter sur des axes radiaux fixés à un anneau tournant autour d'un support cylindrique dont l'axe est confondu avec l'axe de rotation du pont. Ces axes ne supportent d'ailleurs pas d'actions verticales, mais donnent lieu à des frottements dans les moyeux des galets à cause des poussées latérales. Si celles-ci s'équilibrent, il n'y a pas de frottement de l'anneau sur le support.

Les galets roulent sur des rails de roulement tout à fait analogues à ceux des ponts tournants de locomotives. Ils peuvent être formés de rails laminés ordinaires ou spéciaux et centrés, soit de segments en acier coulé souvent évidés. On préfère actuellement les rails centrés posés sur des dées en béton par le moyen de plaques réglables. La voie de roulement doit être inébranlable. Le pont repose sur les galets par un cercle de mobile analogue fixé au chevêtre.



Les galets peuvent être pleins et allongés ou, de préférence, d'assez grand diamètre et en forme de roues. Il est bon d'avoir un pivot pour guider le mouvement de rotation ; parfois ce pivot

supporte aussi une partie de la charge.

On peut assimiler à une couronne de roulement de faible diamètre la crapaudine à boulets des ponts de petite portée, qui est formée de larges plateaux guidés par un petit axe vertical et entre lesquelles des billes de grand ϕ sont placées dans des ornières de roulement. Le chevêtre repose sur le plateau supérieur par une rotule.

§4. Autres appuis sur la pile de pivot.

La pile de pivot supporte encore d'autres appuis, tout d'abord les galets de roulement, qui sont destinés à limiter les mouvements d'oscillation du pont ouvert reposant sur son pivot, tant dans le sens latéral sous l'effet du vent que dans le sens longitudinal par basculement.

Il suffit généralement donc de 4 galets disposés à 90° , dont deux

sur l'axe longitudinal du pont, ou bien 8 par groupes de 2. Ces galets sont à vrai dire des roues, qu'il est bon de prendre d'un assez grand diamètre. Les paliers sont fixés dans des flasques boulonnées sur des longrines et traversines spéciales du chevalet. Une voie de roulement circulaire est fixée sur la pile.

Si r est le rayon du chemin de roulement et v la hauteur d'action de la pression du vent au dessus de la tête du pivot, la réaction verticale du pivot latéral est :

$$V = \frac{Fv}{r}$$

Cette formule suppose le basculement latéral négligeable. S'il ne l'est pas, il faudrait déterminer les valeurs de r et de v après basculement, dont les variations sont d'ailleurs très faibles, et tenir compte de l'excentricité du poids résultant du mont. du centre de gravité du pont. Le moment correspondant, d'ailleurs toujours très faible, s'ajoute à celui du vent si le centre de gravité est au dessus du pivot et s'en retranche dans le cas opposé.

En cas de basculement sous l'effet d'un excès de poids ΔP encastré de λ par rapport au pivot, la réaction du galet est

$$B = \frac{\lambda \times \Delta P}{r}$$

Il est bon que les paliers soient réglables.

Lorsque le pivot ne doit pas être soulevé, les galets sont verticaux (à axes horizontaux), le chemin de roulement est posé sur la partie supérieure de la pile. Si le pivot est à souèvement, comme les galets sont soulevés avec lui, il faut qu'ils soient horizontaux (à axes verticaux), ils roulent alors sur un cerclage métallique extérieur à la pile, qui doit être un cylindre circulaire, ou à l'intérieur d'une arche cylindrique disposée dans la pile.

Enfin la pile porte souvent des appuis fixes sur lesquels le pont repose en position fermée. Ce sont de préférence des appuis à rotules agissant sous les longerons à peu de distance de l'alignement du pivot. Il est désirable que lorsque le pivot repose sur ces appuis, les lentilles perdent le contact. On considère parfois que les appuis

fixes servent à supporter les effets des charges mobiles, mais, outre qu'il n'est pas certain que le contact soit assuré partout, la répartition des réactions d'appui dépend des déformations des appuis et se fait donc aussi sur le pivot pour les charges mobiles, d'autant plus que le pivot, par ses grandes dimensions, est plus rigide que les autres appuis. Dans cet ordre d'idées, on ne peut considérer comme efficaces les galets de calage qui sont parfois disposés sur la pile de pivot sous les maîtresses poutres, dans l'axe transversal du pivot, que si, au moment de la fermeture, les plaques d'appui fixées sous les maîtresses poutres et dressées en forme de coins assurent, par le mouvement de rotation du pont, un léger soulèvement des maîtresses poutres, qui doit être réglable par variation de la hauteur des plaques ou des galets.

Le contact des appuis peut être assuré simplement par le basculement. Dans certains cas, on rend le sabot d'appui fixe sous les longerons mobile par translation horizontale latérale. Avant l'ouverture, il faut donc soulever légèrement le pont au centre pour pouvoir retirer les sabots d'appui, qui s'effacent en vue de permettre le basculement (Cappelle au Bois)

Dans certains ponts doubles dissymétriques, les volées travaillent en position fermée comme un arc à trois rotules, les culasses formant consoles. Les volées portent alors près des pivots des rotules qui, par abaissement du pivot, s'engagent dans leurs sabots fixés sur les culées. Les culées des culasses de faible longueur sont complètement situées dans des renforcements des culées. Les maîtresses poutres des volées ont généralement une forme spéciale à membre inférieure courbe en forme d'arc.

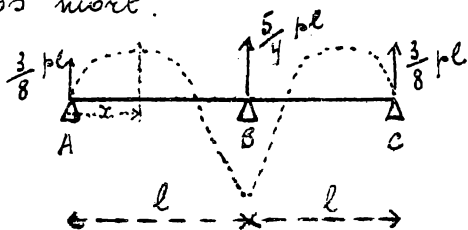
§5 - Calage des extrémités

À la fin de la fermeture, le pont est simplement appuyé sur le pivot, les extrémités des maîtresses poutres sont libres et sans réaction. On ne peut admettre le passage des charges mobiles dans ces conditions, parce qu'elles rompraient l'équilibre, donneraient lieu à des

démovellations des extrémités par rapport à la chaussée fixe et fati-
 queraient le pivot. On doit donc assurer un appui effectif sous les
 extrémités du pont par soulèvement de ces extrémités, cela s'appelle le
 calage. Le calage est plus ou moins considérable. S'il réalise à peine
 le soulèvement des extrémités, il n'intervient comme appui que sous
 l'effet des charges mobiles. La section des maîtresses poutres au droit
 du pivot est très fatiguée. Il y a intérêt, pour réduire la fatigue, à
 réaliser un calage tel qu'en position fermée les trois appuis du pont
 soient de niveau, c'est ce que l'on pourrait appeler le calage complet.
 Il peut y avoir intérêt à aller plus loin encore, pour réduire le moment
 à l'appui central. La situation optimum serait réalisée en assurant
 l'égalité des moments maxima des deux signes, compte tenu des charges
 mobiles, ce qui s'étudie par les lignes d'influence. On détermine les ma-
 xima des deux signes avec calage complet, on en déduit la différen-
 ce. On détermine ensuite la réaction d'extrémité supplémentaire nécessai-
 re pour compenser la différence, d'où le supplément de calage, déduit
 de l'élastique tracé pour les lignes d'influence.

Par exemple, considérons un pont tournant symétrique à poutres à
 âme pleine de section constante et envisageons le calage complet

a) poids mort.

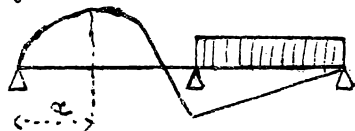


$$M_B = -\frac{pl^2}{8}$$

$$M_{max} = \frac{9pl^2}{128} = 0,0703 pl^2$$

$$\text{à distance } x = \frac{3}{8} l$$

b) surcharge mobile q



$$M_{B_{max}} = -\frac{ql^2}{8} \text{ toutes les travées chargées}$$

$$M_{max} = \frac{49}{512} ql^2 \text{ à distance } x = \frac{7}{16} l$$

$$= 0,0957 ql^2$$

Donc au total

$$M_{B_{max}} = -\left(\frac{p+q}{8}\right) l^2$$

$$M_{max} = \frac{3l^2}{128} (3p + 4q) \text{ environ, à distance } x = \frac{3}{8} l$$

Le calage optimum correspond à une réaction supplémentaire R_A telle

que
$$M_{B_{max}} - R_A l = M_{max} + R_A \frac{3}{8} l$$

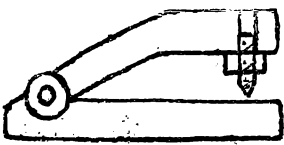
$$\text{d'où } R_a = \frac{M_{B \max} - M_{\max}}{\frac{1}{3} l}$$

ce qui donne R_a . Connaissant la flèche à l'extrémité A par unité de charge en A, on en déduit la hauteur de calage supplémentaire.

La flèche spécifique est $2 \gamma = \frac{l^3}{3 EI}$

Donc le soulèvement supplémentaire est $\frac{R_a l^3}{3 EI}$ à chaque extrémité. Le calage peut être reporté sur un seul appui, mais il doit alors être double.

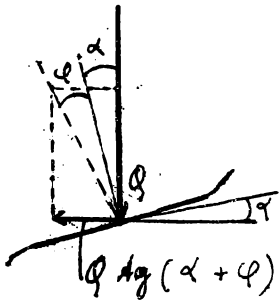
On obtient ainsi le maximum d'économie des maîtresses poutres. Mais il faut alors veiller à assurer exactement un calage conforme aux hypothèses, car toute insuffisance de calage fatigue les poutres avec excès. D'autre part, les efforts et la course de calage, donc le travail de calage, deviennent très importants et coûteux, si l'on ne prend pas les dispositions nécessaires pour récupérer ce travail lors du décalage. Le degré de calage doit donc être déterminé avec soin, mais il y a intérêt à assurer au moins le calage complet. Le degré de calage est généralement assez faible dans les petits ponts, où l'on veut éviter des complications mécaniques - hors de proportion avec l'importance de l'ouvrage; il y a par contre intérêt à l'élever pour les grands ponts. Nous avons vu que le calage peut se faire indirectement par translation verticale du foyers. Nous examinons ici le calage proprement dit par les extrémités. Dans les petits ponts, le calage le plus simple consiste à placer sous les extrémités des maîtresses poutres des petits sabots ou galets qui, au moment de la fermeture et sous l'effet de la force vive du pont gravissent des sabots fixes profilés en forme de plans inclinés, qui obligent un soulèvement des extrémités des poutres. Ces plans inclinés sont réglables par vis et écrous ou par clavettes, ou par coins à vis. Ces plans inclinés sont à simple ou double talus, suivant que la rotation est de 90° ou de 180° . Dans les ponts dissymétriques, ce calage n'existe généra-



lement qu'à l'extrémité de la volée, dont le soulèvement réalise un léger basculement du pont qui oblige les extrémités des poutres de la

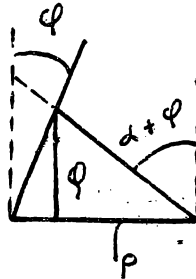
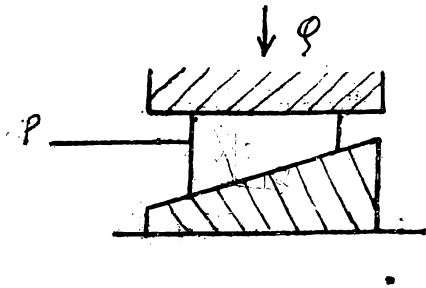
à entrer en contact avec ses appuis fixes.

Pour les grands ponts, ce procédé rudimentaire de colage incomplet est insuffisant. Il faut soulever l'extrémité des maîtresses poutres par un dispositif mécanique, donc par un verin.



Un verin hydraulique n'est pas avantageux, à cause de la réaction variable sous l'effet des charges mobiles ainsi que des hautes d'eau.

Il est donc nécessaire, après soulèvement, de dégager les verins au moyen d'un sabot d'appui glissant. Ce sabot est analogue à ceux décrits précédemment pour les appuis centraux. Lors du décalage, il faut tout d'abord soulever pour pouvoir retirer les sabots. Ce dispositif est donc très compliqué, de même



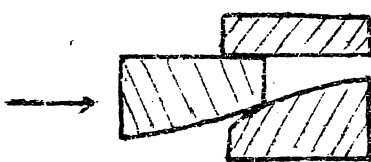
que celui qui consiste à manoeuvrer hydrauliquement les dispositifs mécaniques ci-après décrits. On préfère généralement la manoeuvre à main ou électrique et on emploie comme verins des

vis, des coins, des cames excentriques ou des sabots à bielle et excentrique. Les mécanismes doivent être irréversibles.

Pour les verins à vis, l'inclinaison de α du filet doit donc être $\alpha < \phi$, angle de frottement. Le moment de rotation sur l'écrou est :

$M = Q_2 \operatorname{tg}(\alpha + \phi)$. Comme Q , effort de colage varie s'il n'y a pas d'équilibrage, M varie de même. Le rendement est constant et égal à $\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \phi)}$, si $\alpha = \phi$, il est $\frac{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}{2}$ et donc inférieur légèrement à

0,50. Il est réduit encore par le frottement de l'écrou, qui peut être monté sur billes.



Pour les coins de colage, la condition d'irréversibilité est aussi $\alpha < \phi$, α étant l'angle du coin.

D'après l'équilibre du coin $P = Q [\operatorname{tg} \phi + \operatorname{tg}(\alpha + \phi)]$ et le rendement est :

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \phi + \operatorname{tg}(\alpha + \phi)} \quad \left(= \frac{P \, dh}{P \, dx} \quad \text{ou} \quad \frac{dh}{dx} = \operatorname{tg} \alpha \right)$$

Pour $\tan \alpha = \tan \varphi = 0,10$ environ, $f = 0,33$ environ.

Le rendement est plus faible que celui de la vis. En outre, le mouvement de rotation du moteur doit être transformé en translation et subir une forte réduction de vitesse. Donc le rendement d'ensemble est mauvais. Enfin l'irréversibilité peut être compromise par les vibrations.

Pour assurer à vitesse de translation constante du coin une certaine uniformité de puissance, on peut couber d'une manière appropriée le sabot fixe. L'irréversibilité n'est plus réalisée qu'en fin de course et encore d'une manière précaire. Il est préférable alors de substituer au coin un galet, on substitue le roulement au frottement. Mais il n'y a plus irréversibilité.

Mais la disposition du sabot en coin convient mieux comme appui qu'une vis, à moins qu'il n'y ait équilibrage.

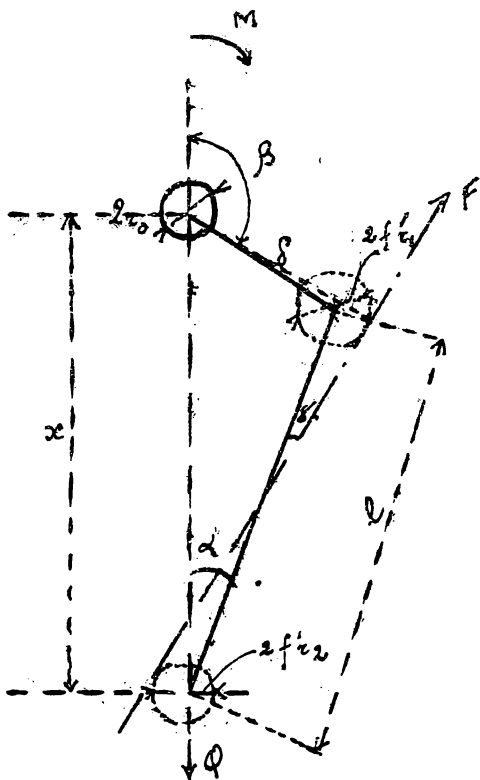
On peut aussi employer un sabot coulissant entre deux glissières verticales fixées aux extrémités des maîtresses-poutres. Le sabot forme la crosse d'une bielle commandée par un excentrique. La crosse prend appui sur un sabot fixe à la culée; la rotation de l'excentrique d'un angle de 90° produit le calage. Le moment résistant varie peu, le bras de levier décroissant en même temps que croît l'effort de calage. Le couple moteur peut être transmis directement, moyennant une multiplication appropriée.

Mais ce mécanisme n'est irréversible que dans un petit angle au voisinage du point mort, donc la transmission doit être irréversible et son rendement est donc très mauvais.

L'équilibre de l'excentrique exige que :

$$M = F(\delta + f'r_0)$$

$f = \sin \varphi$ et r_0 : rayon de l'arbre d'excentrique
 appelons r_1 le rayon du plateau de l'excentrique et r_2 le rayon de l'axe de crosse.
 Par l'effet du frottement, on sait que les réactions des tourillons, au lieu de passer



par le centre, deviennent tangents à des cercles concentriques de rayon égal au rayon du tourillon multiplié par $\sin \varphi$. Il en résulte que l'effort F n'est pas dirigé suivant la bielle, mais fait avec elle un angle δ tel que

$$\operatorname{tg} \delta = f' \frac{(r_1 + r_2)}{l}$$

l étant la longueur de la bielle. Donc, $M = F [x \sin (\alpha + \delta) + f' r_0]$

Par suite de l'obliquité de la bielle, la crosse est appuyée contre les glissières et donne une réaction, inclinée de φ sur la normale par suite du frottement. Donc l'effet de calage Q est égal à

$$Q = F \sin (\alpha + \delta) [\operatorname{cotg} (\alpha + \delta) - \operatorname{tg} \varphi]$$

$$Q = F [\cos (\alpha + \delta) - \sin (\alpha + \delta) \operatorname{tg} \varphi] = \frac{F \cos (\alpha + \delta + \varphi)}{\cos \varphi}$$

donc $F = \frac{Q \cos \varphi}{\cos (\alpha + \delta + \varphi)}$

On peut poser $\cos \varphi = 1$

donc $F = \frac{Q}{\cos (\alpha + \delta + \varphi)}$

et

$$M = \frac{Q (x \sin (\alpha + \delta) + f' r_0)}{\cos (\alpha + \delta + \varphi)}$$

On connaît Q en fonction de x , on peut donc établir la loi de M en fonction de x ou de l'angle de rotation β .

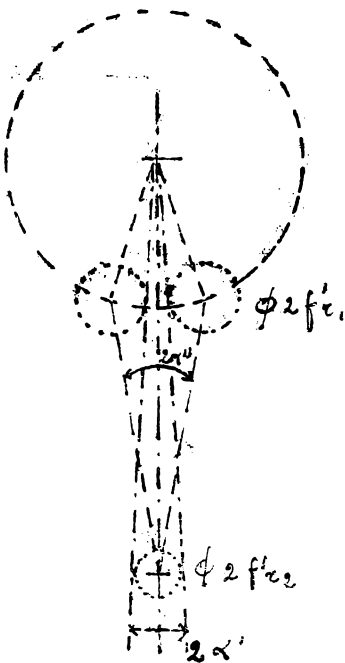
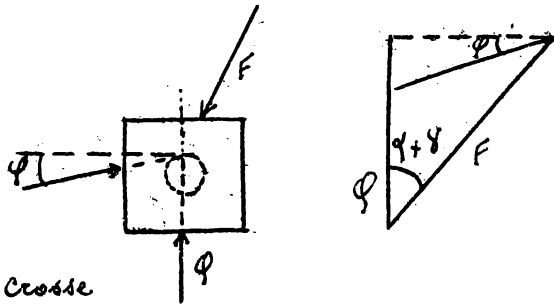
Le rendement est $\rho = \frac{Q dh}{M d\beta} = \frac{\cos (\alpha + \delta + \varphi)}{x \sin (\alpha + \delta) + f' r_0} \frac{dh}{d\beta}$

ρ est nul pour $\beta = 0$ et $\beta = \pi$ et maximum pour $\beta = \frac{\pi}{2}$

Le rendement moyen est $\rho_m = \frac{\int Q dh}{\int M d\beta}$

et pourrait se déterminer par le rapport des aires des diagrammes des Q en fonction de h et de M en fonction de β .

L'irréversibilité est réalisée seulement dans le petit angle $2\alpha'$ des forces ou encore $2\alpha''$ des axes de la bielle. Pratiquement, le cercle de $\varphi 2f'r_2$ peut être confondu avec son centre. Lorsque la course est faible, on substitue à la bielle avec crosse une simple came excentrique. Il résulte de ce qui précède qu'il n'est pas



que le calage par vis à vis est le meilleur ; il est employé dans un grand nombre de ports importants (Wilhelmshafen, Subeck etc). On la munit souvent d'un véritable appareil d'appui à rouleaux pour centrer la réaction et permettre les dilatations (Wilhelmshafen). Comme dans un vis à vis ordinaire, la vis est guidée dans l'intérieur d'un bâti fixe et mue sur un écrou tournant sur billes. Il peut être fixé sur la culotte (dans les très grands ports comme à Wilhelmshafen), le plus souvent il est porté par le pont. Il a l'inconvénient de ne pas assurer d'équilibrage par suite de l'irréversibilité.

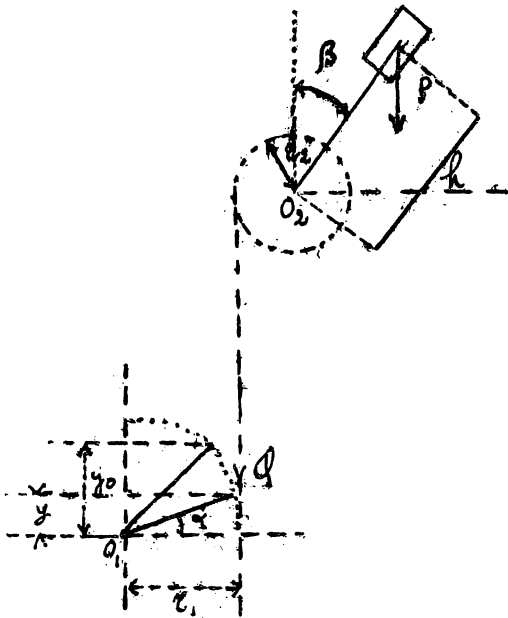
Le coin a l'avantage d'une plus grande robustesse et simplicité, mais le mécanisme est complexe. Il se coince facilement. Pour éviter ce défaut, on remplace parfois le plan incliné par une file de galets, mais l'irréversibilité propre n'existe plus et doit être assurée par le mécanisme ou remplacé par l'équilibrage. Il est préférable alors d'employer un galet de calage roulant sur un sabot courbe. Sa bielle ne présente pas beaucoup d'avantages, le mécanisme est plus employé sous la forme simple de came excentrique qui, n'étant pas irréversible, permet l'équilibrage sur son axe. Le sabot fixe sur lequel l'appareil de calage prend appui doit toujours être réglable, par clavettes ou vis. Le mouvement de l'appareil de calage est généralement dans le plan axial du longeron correspondant. Un dispositif intéressant pour les petits ports à longerons multiples consiste à prévoir le mouvement des mécanismes de calage dans un plan transversal sous les appuis et non dans les plans longitudinaux de chaque appui. On peut ainsi avoir une commande unique du calage par crémaillère à coins multiples (Amsterdam) ou à galets multiples, ou des cames commandées par une même tringle, etc.

§6 Équilibrage du soulèvement

Lors du soulèvement d'un appui quelconque, d'extrémité (calage) ou central (soulèvement du pivot), on effectue un travail considérable que l'on transforme en énergie potentielle. Il est évidemment intéressant de récupérer cette énergie potentielle, de sorte que le travail total

de soulèvement et d'abaissement se réduit à celui des frottements, d'ailleurs important. La difficulté de l'équilibrage consiste dans la variation de l'effort entre des limites très étendues : zéro et un maximum élevé.

Le dispositif le plus courant d'équilibrage consiste à réduire l'effort de soulèvement par des leviers de réduction. L'extrémité du dernier agit sur une chaîne enroulée sur une came de forme convenable et dont l'axe porte un bras à l'extrémité duquel agit un contre poids constant. Le profil de la came doit être tel que la somme des travaux du système soit nul en tenant compte de la variation de l'effort de soulèvement en fonction de la course. C'est une application simple de statique. Le récupérateur de Schwedler est particulièrement simple, parce qu'il fait agir l'effort



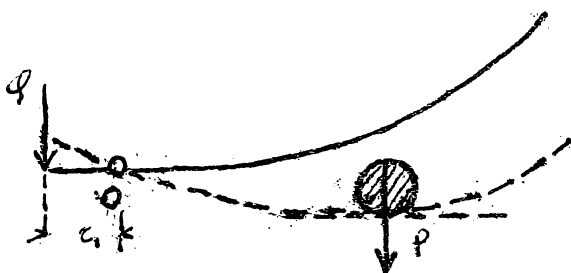
de calage sur une came circulaire. Soit r_1 son rayon. L'équilibrage exige que la came d'enroulement de la chaîne soit un cercle de rayon $r_2 = \frac{r_1}{2}$. En effet : soit y_0 l'ordonnée correspondant à l'effort maximum Q_0 . à une ordonnée $y = r_1 \sin \alpha$ correspond $Q = Q_0 \frac{y}{y_0} = Q_0 \frac{r_1 \sin \alpha}{y_0}$

Donc $Q = 0$ pour $\alpha = 0$. L'équilibrage exige que : $Q dy = P dx = P d [h(1 - \cos \beta)]$
ou $Q_0 \frac{r_1 \sin \alpha}{y_0} r_1 \cos \alpha d\alpha = P h \sin \beta d\beta$

$$\text{D'où } P = \frac{Q_0 r_1^2}{4 h y_0} \frac{\sin 2\alpha d(2\alpha)}{\sin \beta d\beta}$$

Comme $r_1 = 2r_2$, on a $\beta = 2\alpha$, donc P est constant.

Un autre système, préconisé par l'ingénieur hollandais Van Hasselt, consiste à faire agir l'effort de soulèvement à l'extrémité du petit bras d'un levier à bras très inégaux. Sur l'autre bras roule un contre poids.



Le profil de ce bras est tel que, dans son mouvement, il équilibre constamment la force de soulèvement par le déplacement du contre poids, qui se trouve toujours au point le plus bas.

On peut concevoir d'autres systèmes à contrepoids constant décrivant une trajectoire spécialement déterminée ou à contrepoids variables. A cause des grands efforts et des petites courses dans l'opération du calage, ces systèmes doivent tous posséder une réduction considérable d'effort par leviers ou engrenages.

Pour les calages irréversibles, l'action d'équilibrage doit être transmise indépendamment des organes de calage par des leviers, cames ou tirés à déplacement vertical, dispositifs qui ne constituent en aucune manière le calage même. Avec le calage par came ou, d'une manière générale, réversible, l'action d'équilibrage peut être transmise par l'organe de calage. Le calage hydraulique, qui convient peu à cause de la variation des efforts, se prête mal aussi à l'équilibrage variable.

Des dispositifs analogues de récupération peuvent être employés pour le soulèvement du pivot. Ils y sont d'autant plus appropriés que les efforts sont plus considérables, mais l'encombrement est plus grand. On peut concevoir l'application des systèmes précédents à équilibrage variable. Mais pour les pivots, on préfère souvent un équilibrage invariable ou presque, correspondant à la majeure partie du poids du pont. De la sorte, tout le poids mort est à peu près supporté par le pivot. Par contre, la réaction du pivot étant constante, le pont agit par rapport aux surcharges mobiles comme une pièce sur deux appuis d'extrémité à appui central subit des déplacements verticaux égaux aux flèches élastiques de cette pièce. Pour éviter les battements aux appuis extrêmes, il faut préférer un équilibrage incomplet. On peut le réaliser par la balance hydraulique (accumulateurs) On peut alors commander le soulèvement du pivot par lestage ou translation des poids chargeant l'accumulateur, comme pour la manœuvre des ponts basculants.

L'équilibrage peut aussi être réalisé par des contrepoids agissant sur le support du pivot ou même de la couronne de galets. (Système Proell et Scharovsky) Le soulèvement se réalise par un effort additionnel relativement faible, exercé sur le dispositif d'équilibrage ou par un verin indépendant, des types décrits, mais généralement à vis.

§ 7. Appuis fixes sur les piles extrêmes

En cas de calage par les extrémités, ces appuis sont constitués par les appareils de calage s'ils sont irréversibles, sinon il faut des sabots mobiles sous les longerons, pouvant s'effacer lors du décalage. En cas de soulèvement du pivot, ces appuis sont à dilatation. Les glissières ou rouleaux restent sur les culées, seule la plaque d'appui supérieure est solidaire des maîtresses-poutres. S'il y a des rouleaux, ils sont rappelés en position normale par des ressorts doubles ou des contrepois lors de l'ouverture du pont. Dans les ponts à double volée, les culasses sont généralement ancrées aux culées, pour les réactions négatives dues aux surcharges mobiles. Si la manœuvre se fait par basculement, la butée contre ces ancrages est automatique lors du calage. Si on opère par soulèvement du pivot, l'ancrage doit être amovible par le moyen de bielles. L'ancrage est prolongé dans la maçonnerie des culées par de forts tirants.

§ 8. Verrouillage.

Comme la plupart des ponts mobiles, les ponts tournants doivent être verrouillés, moins pour éviter les manœuvres intempestives que pour assurer la position exacte de fermeture, notamment en vue du calage. Le verrouillage doit donc précéder le calage. Parfois les commandes sont interdépendantes et simultanées.

Le verrouillage des ponts à simple volée se fait à une extrémité seulement. Il peut être confondu avec le calage pour les petits ponts, où il se fait de la manière décrite. Cependant, on prévoit généralement en plus des sabots de calage un cliquet ou crochet pivotant, fixé à la culée et qui accroche un ergot fixé à un longeron. Ce cliquet peut être traînant et accrocher l'arrêt en fin de course; il est alors fixé sous le pont. Si la rotation est de 180° , il doit être double et l'arrêt est à double baillie. Avant l'ouverture, il faut dégager les crochets.

Le verrouillage est souvent automatique. Il comporte alors un galet monté sur une tige verticale qui soulève avec ressort antagoniste ou

une tige pivotante horizontale formant loquet autour d'un axe horizontal et également rappelée vers le bas par un ressort. Ces dispositifs sont placés sous ou en saillie sur la traverse d'extrémité, en son milieu. A la fermeture ils rencontrent une gâche métallique scellée dans la culée ou pile, présentant un plan incliné, que le galet ou le loquet doivent gravir en se soulevant et en tendant le ressort antagoniste. A la position de fermeture correspond une encoche, dans laquelle le ressort repousse le galet ou le loquet. Afin d'éviter des chocs violents, notamment en fin d'ouverture on peut rendre cette gâche oscillante avec double ressort de rappel si le pont peut tourner de 180° . Avec cette disposition, qui remplace les heurtoirs de fin de course sur les estacades, on peut profiler l'encoche peu profonde de telle sorte que le verrou peut se dégager lui-même si la vitesse est excessive. Avant l'ouverture, il faut dégager le loquet par un doigt commandé par triangle et levier ou par un contrepois normalement soulevé par tension d'un fil; en laissant détendre le fil, le contrepois soulève un doigt qui dégage le loquet.

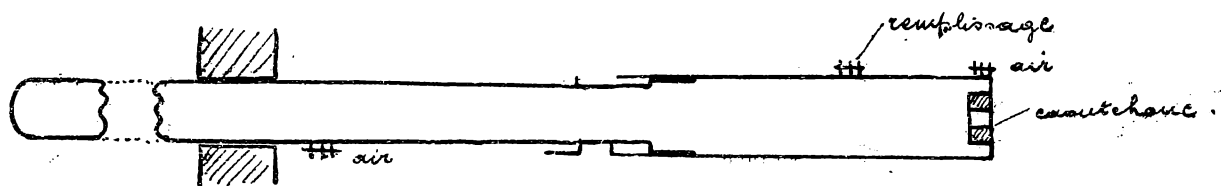
On peut aussi employer un verrou plat à translation s'engageant dans une douille à entonnoir fixée dans la maçonnerie de la culée, l'entonnoir guidant l'entrée du verrou qui est commandé lors de l'ouverture comme de la fermeture.

Dans les ponts tournants à double volée, il y a un verrouillage des deux volées qui se fait, comme dans les ponts basculants, par un verrou plat commandé. Il pourrait aussi se faire par des loquets à ressorts comme aux extrémités des culasses, mais ce dispositif est au fond moins simple et sans avantages. Dans le cas où les volées fermées travaillent comme arc à trois rotules, il faut que par basculement les rotules de chef entrent en contact, elles sont en outre verrouillées d'une manière qui permette le jeu des rotules mais empêche les déplacements latéraux.

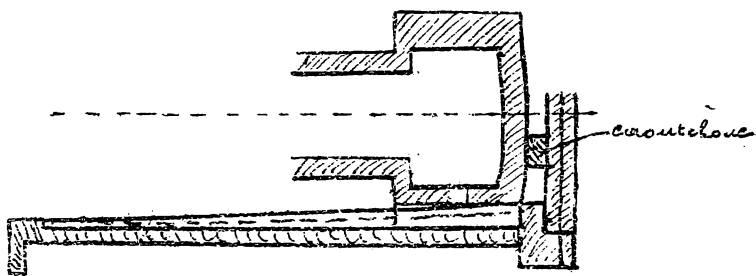
Enfin, en position ouverte, il peut y avoir un verrouillage de position d'ouverture sur les estacades ou ducs d'axe, constitué comme les verrouillages de piles.

§ 9. Heurtoirs.

Malgré les interrupteurs automatiques de fin de course et les freins électromagnétiques éventuels, le pont peut posséder en fin de course une certaine vitesse qui lui donne une force vive considérable. Il peut ainsi dépasser sa position extrême si la rotation est libre ou heurter violemment des installations fixes des piles et causer des accidents. Il est donc utile de faire buter le pont en fin de course contre des heurtoirs élastiques, aussi bien en position de fermeture que d'ouverture.

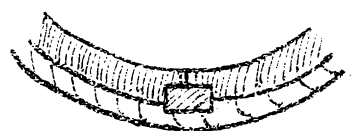


La rotation est alors nécessairement limitée à 90° . On peut employer des butoirs à ressorts spiraux, comme les tampons de chemin de fer ou, mieux, les butoirs hydro-pneumatiques progressifs, analogues aux freins récupérateurs des pièces d'artillerie. Ils sont remplis de glycérine, liquide à forte viscosité et grand dissipateur d'énergie, en outre incongelable. Cette



glycérine remplit un cylindre fixe dans lequel se meut le piston. heurtoir. Le piston est creux et rempli d'air. Il possède une rainure qui embrasse une saillie

longitudinale intérieure du cylindre en forme de coin dans le fond de la rainure du piston, un trou de petit diamètre est percé dans sa paroi. Normalement, le piston est à fond de course hors du cylindre. Sous l'effet d'un choc il s'enfonce. La glycérine ne peut s'échapper devant le piston



qu'en passant dans l'espace entre la rainure et le coin, qui va en se rétrécissant au fur et à mesure que le piston s'enfonce. La glycérine est aussi obligée de pénétrer dans l'intérieur du

piston par le petit trou et de comprimer l'air. Par suite de la grande

viscosité de la glycérine et de la compression de l'air, la résistance est grande et croissante. Après arrêt, l'air comprimé se détend en chassant la glycérine devant le piston, le heurtoir revient en batterie.

§ 10. Éclissages mobiles, enclanchements, etc ...

Les ponts tournants sont les ponts mobiles les plus employés pour les chemins de fer. La sécurité exige des dispositifs spéciaux, notamment des enclanchements de la manœuvre du pont avec les signaux. Ces enclanchements se font d'après les dispositifs généraux d'enclanchement en emploi sur la ligne; le plus souvent électromagnétiques. Des dépendances peuvent aussi être établies d'une manière simple par des dispositifs mécaniques, composés le plus souvent de triangles dont les trajectoires se croisent et portent des encoches ou trous permettant les mouvements relatifs dans des positions et un ordre bien définis seulement. Il faut que l'action de ces dispositifs, tant mécaniques qu'électriques, ne soit pas influencée par les intempéries.

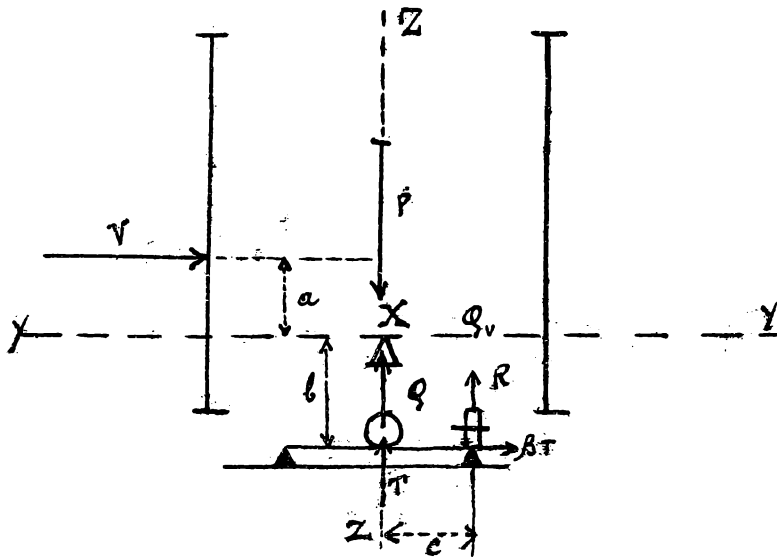
À l'interruption des rails entre le tablier mobile et la voie fixe, il existe un joint assez large donnant lieu à des chocs et exposant à des bris de rails et des déraillements, particulièrement dangereux en un tel endroit. Des abouts de voies doivent donc être bien appuyés sur des traverses nombreuses avec bannes spéciales. Anciennement, on verrouillait ces bannes en regard par des tiges, afin d'assurer la coïncidence des voies. Actuellement on remplace ces tiges par des rails ou éclisses glissantes, légèrement en saillie au dessus du bourrelet des rails, de telle sorte que la roue passe sans choc sur le joint.



Ces dispositifs spéciaux pour ponts tournants de chemin de fer sont applicables aux autres types de ponts mobiles.

§ 11. Étude dynamique de la gyration du pont.

Supposons le poids total P légèrement excentré par rapport au pivot et supposons qu'il existe un effet latéral V du vent également excentré, le pont étant dissymétrique. Il en résulte que le pont repose sur son pivot et deux galets de gyration disposés l'un suivant l'axe du pont,



l'autre sur la perpendiculaire.
 Les équations d'équilibre statique sont :

suitant z z : $P = Q_v + T + R$

• y y : $V + \beta T = Q_v$

(β : coefficient de résistance des galets).

suitant x x : $\beta R = Q_v$

moment autour de x x : $V a = R c + \beta T b$

" " " y y : $\beta R b + P_p = T c$

moment autour de z z : $M_z = \beta(R+T)c - V_v +$

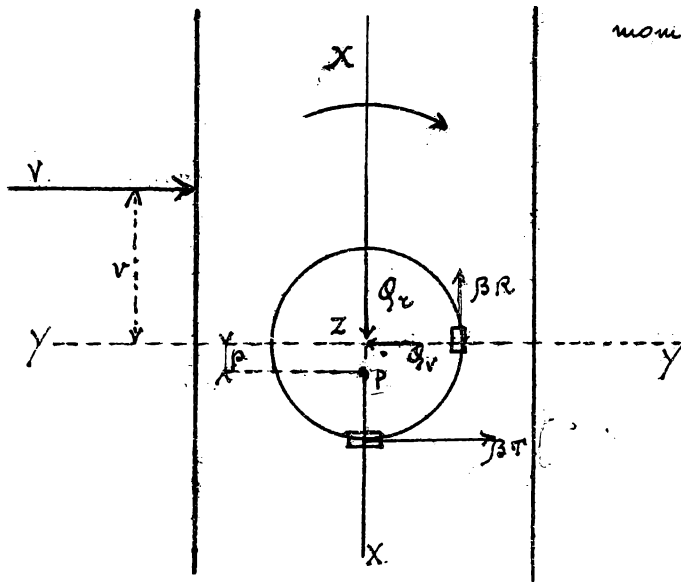
$\alpha Q \times \frac{2}{3} r_p$.

α étant le coefficient de frottement du pivot, r_p son rayon.

on admet pour $\beta = 0,003$

(pour des roues de 1 à 3 m de ϕ ,
 $\delta = 1,5$ à $0,5$ mm)

On admet $\alpha = 0,10$ pour pivots,
 jusque $0,20$ (graissage intermittent)
 $0,05$ (" " sous pression)



on admet $\alpha = 0,07$ pour colliers

= $0,05$ pour paliers (Voir H. Descans. Annales A.I.C. 1923)

de (1) (2) $\rightarrow V a = R c + \beta b \times \frac{\beta R b + P_p}{c}$

de (1) $\rightarrow R (\beta^2 b^2 + c^2) = V a c - P_p \beta b$ d'où $R = \frac{V a c - P_p \beta b}{\beta^2 b^2 + c^2}$

de (2) $\rightarrow T = \frac{\beta b}{c} \frac{V a c - P_p \beta b}{\beta^2 b^2 + c^2} + \frac{P_p}{c} = \frac{\beta b V a + P_p c}{\beta^2 b^2 + c^2}$

Tous les éléments de M sont ainsi déterminés en fonction des données : P, V, a, b, c, p, v, r_p , α et β . Le vent est supposé normal au pont.

Si le pont est symétrique, $v = 0$; la formule de M_z se simplifie.

Si en outre le pont est équilibré, $p = 0$, les expressions de T et R se simplifient. S'il n'y a pas de vent, $V = 0$ et si le pont est équilibré,

$p = 0$, donc $R = T = 0$, $P = Q$ et $M_z = \alpha P \times \frac{2}{3} r_p$

Les équations précédentes correspondent au mouvement uniforme, les forces d'inertie sont nulles et les forces centrifuges se compensent, sous réserve de l'excentricité, relativement faible, des poids du pont par rapport au pivot. au démarrage ou lors de l'arrêt et, d'une manière générale, en période variable :

$$I \frac{dw}{dt} = M_m - M_R = M_a.$$

M_m étant le moment moteur, M_a le moment accélérateur net appliqué au tablier et I le moment d'inertie polaire. Il est avantageux, pour réduire la puissance max., de lancer le pont à couple moteur constant, puis de le laisser ralentir. Pour éviter une manœuvre trop lente, il faut qu'il possède encore une certaine vitesse en fin de course, qui doit être absorbée par des butoirs ou freins automatiques, de préférence électromagnétiques. Supposons le couple accélérateur constant.

Pendant le lancement $\frac{dw}{dt} = \frac{M_a}{I}$, $w = \frac{M_a}{I} t$ et $\alpha = \frac{M_a}{I} \frac{t^2}{2}$

au bout du temps t_1 on coupe le courant : $w_1 = \frac{M_a t_1}{I}$ et $\alpha_1 = \frac{M_a}{I} \frac{t_1^2}{2}$

Pendant la période retardée, l'équation du mouvement est :

$$\frac{dw}{dt'} = -\frac{M_r}{I}, \quad w' = \frac{M_a}{I} t_1 - \frac{M_r}{I} t', \quad \alpha' = \frac{M_a}{I} t_1 t' - \frac{M_r}{I} \frac{t'^2}{2}$$

La vitesse finale à réaliser est w_2 , donc $t'_2 = \left[\frac{M_a}{I} t_1 - w_2 \right] \frac{I}{M_r}$

et $T = t_1 + t'_2 = t_1 + \left(\frac{M_a}{I} t_1 - w_2 \right) \frac{I}{M_r}$

D'autre part, la gyration est égale à α_2 , donc :

$$\alpha_2 = \frac{M_a}{I} \frac{t_1^2}{2} + \frac{M_a}{I} t_1 \left[\frac{M_a}{I} t_1 - w_2 \right] \frac{I}{M_r} - \frac{M_r}{2I} \left[\frac{M_a}{I} t_1 - w_2 \right]^2 \frac{I^2}{M_r^2}$$

Donc $T = t_1 \left[1 + \frac{M_a}{M_r} \right] - w_2 \frac{I}{M_r}$

$$\alpha_2 = \frac{M_a}{I} \frac{t_1^2}{2} \left(1 + \frac{M_a}{M_r} \right) - \frac{w_2^2}{2} \frac{I}{M_r} = \frac{M_a}{2I} \frac{\left(T + w_2 \frac{I}{M_r} \right)^2}{\left(1 + \frac{M_a}{M_r} \right)} - \frac{w_2^2}{2} \frac{I}{M_r}$$

d'où $t_1 = \frac{T + w_2 \frac{I}{M_r}}{1 + \frac{M_a}{M_r}}$

et $M_a = \frac{\left(2\alpha_2 + \frac{w_2^2 I}{M_r} \right) I M_r}{M_r \left(T + w_2 \frac{I}{M_r} \right)^2 - \left(2\alpha_2 + w_2^2 \frac{I}{M_r} \right) I}$

C'est le couple accélérateur constant qui assure l'ouverture d'un angle α_2 dans un temps T avec une vitesse finale w_2 . Si au lieu de

change de sens et croît en valeur absolue en même temps que $-\frac{dw}{dt}$.

On a
$$2r\tau = Ma \text{ ou } Mf.$$

À la fin de la manoeuvre, l'excédent de force vive est absorbé par choc sur le heurtoir ou le verrou; il en résulte un effort τ' dont on peut déterminer le maximum d'après les caractéristiques de l'appareil et qui agit à distance r' du pivot. Le moment retardateur correspondant est $\tau'r'$. Donc

$$2r\tau = -I \frac{dw}{dt} = M_r + \tau'r'$$

d'où
$$\tau = \frac{M_r}{2r} + \frac{\tau'r'}{2r}$$

À ce moment, C est sensiblement nul et le pivot subit une réaction égale et de même sens que τ' . Dans la section transversale MM' du pivot se développent donc:

- 1°) un moment fléchissant $M = r\tau - r'\tau'$, égal à $\frac{Ma}{2}$ en période accélérée, $\frac{Mf}{2}$ en période freinée et $\frac{Mf}{2} - \frac{\tau'r'}{2}$ en période de choc.
- 2°) une traction égale à C
- 3°) un effort tranchant égal à $\tau - \tau'$.

Si l est la largeur du tablier, il se développe dans une des maîtresses pontes une traction $\frac{M}{l\Omega} + \frac{C}{\Omega}$, dans l'autre une compression $\frac{M}{l\Omega} - \frac{C}{\Omega}$; quand $M = 0$, il y a traction partout. Ω est la sec. transversale des maîtresses pontes. Ces tensions se répartissent entre les membrures d'une manière variable d'après la situation relative du tablier. S'il y a un contreventement, les formules des tensions ne sont pas valables; il faut calculer les fatigues du contreventement sous les efforts calculés ci-dessus.

§ 13. Mécanismes de manoeuvre de rotation.

Les petits ponts tournants se manoeuvrent souvent à main, par un effort appliqué directement à l'extrémité de la culasse. Le pontonnier pousse la culasse en circulant sur un chemin établi dans l'encurement de la culée ou sur une petite passerelle; ce chemin est garni de liteaux pour donner un appui au pied. Le chemin peut être remplacé par une crémaillère circulaire fixe dans laquelle engrène un

spignon à bout cassé monté sur le tablier et que le pontonnier fait tourner à l'aide d'une manivelle à douille. - rayon de la manivelle: 0,35 ou bien tourne à gauche de 2.00 de longueur. Enfin, l'extrémité de la culasse peut être mue par un secteur denté, une bielle dentée ou non, ou deux câbles actionnés par spignons, cabestans ou treuils à tambours fixés sur la culée et mûs manuellement.

Pour hâter les manœuvres manuelles, on peut aussi prévoir des accumulateurs, par exemple des poids levés par des moufles et agissant comme moteurs lors de la manœuvre. Au double pont tourment de Euback, on a utilisé pour cet office les contrepoids de culasse.

Ces derniers dispositifs peuvent être mûs mécaniquement, par la vapeur, l'eau sous pression ou l'électricité. Les mêmes dispositifs peuvent d'ailleurs s'établir avec les mécanismes sur le tablier, le secteur denté, la bielle ou les câbles étant fixés à la culée. Pour une manœuvre par la culasse, la fixation des mécanismes sur la culée paraît toujours préférable.

La manœuvre peut être reportée sur la pile centrale. Elle comporte alors généralement une couronne dentée circulaire fixée sur la pile et attaquée par un spignon mû à main ou mécaniquement et solidaire du tablier. La disposition inverse: moteur sur la pile et couronne fixée au tablier n'est pas en usage; elle s'accomode mal des déformations et des mouvements du tablier. D'une manière générale, il faut réduire la longueur des éléments solidaires du tablier, à cause des flexions, et prévoir des dispositifs de flexibilité spéciale pour les longs arbres. Le mécanisme doit tenir compte des mouvements du tablier. La couronne et le spignon doivent notamment être légèrement coniques si le pont est à basculement. Un autre dispositif, assez employé à l'étranger et qui paraît avantageux, consiste à enrouler un câble sans fin dans une gorge circulaire fixée sur la pile; ce câble est enroulé d'autre part sur un treuil à friction solidaire du tablier.

Les pivots à soulèvement sont parfois mûs directement; l'effort

tangentiel à leur application est très grand. Il est transmis par un pignon ou par une chaîne Galle ou un câble, mais par des machines établies dans un évènement de la pile.

Le mécanisme de gyration comporte généralement une forte réduction de vitesse, donc de nombreux mécanismes. Il est utile d'apprécier les effets d'inertie de ces mécanismes. Considérons par exemple un mécanisme de gyration comportant:

| | moments d'inertie | rendements totaux | rapports de réduction par rapport au rotor. | Parts correspondantes du moment M_a du rotor |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|---|--|
| 1 le rotor | I_1 | $\eta_1 = 1$ | $\mu_1 = 1$ | m_1 |
| 2 l'accouplement et le réducteur | I_2 | $\eta_2 = 1$ | $\mu_2 = 1$ | m_2 |
| 3 un axe à roue cylindrique | I_3 | $\eta_3 (< \eta_2)$ | $\mu_3 (> \mu_2)$ | m_3 |
| 4. un axe à roue cyl. | I_4 | $\eta_4 (< \eta_3)$ | $\mu_4 (> \mu_3)$ | m_4 |
| 5 un axe à roue conique | I_5 | $\eta_5 (< \eta_4)$ | $\mu_5 (> \mu_4)$ | m_5 |
| t le tablier | I_t | $\eta_t (< \eta_5)$ | $\mu_t (> \mu_5)$ | m_t |

On a $I_1 \frac{dw_1}{dt} = \eta_1 \mu_1 m_1$ $I_2 \frac{dw_2}{dt} = \eta_2 \mu_2 m_2 \dots \dots \dots$ $I_t \frac{dw_t}{dt} = \eta_t \mu_t m_t$

ainsi que $\mu_1 w_1 = \mu_2 w_2 = \dots \dots \dots \mu_t w_t$

Le moment accélérateur total est $M_a = \sum_1^t \left(\frac{I \frac{dw}{dt}}{\mu \eta} \right) = \mu_k \frac{dw_k}{dt} \sum_1^t \left(\frac{I}{\eta \mu^2} \right)$

Donc : $\frac{dw_k}{dt} = \frac{M_a}{\mu_k \sum_1^t \frac{I}{\eta \mu^2}}$

$m_k = \frac{I_k M_a}{\eta_k \mu_k^2 \sum_1^t \frac{I}{\eta \mu^2}}$ Pour le tablier, $k = t$

En tenant compte du rendement total η_t , les moments moteur et accélérateur sur le rotor sont liés par : $M_a = M_m = \frac{M_r}{\eta_t \mu_t}$

M_r étant le moment résistant du tablier. Pour un organe quelconque du mécanisme, le moment total qu'il transmet est :

$$M_k = \eta_k \mu_k \left(\frac{M_r}{\eta_t \mu_t} + \sum_{k+1}^t m \right)$$

$$= \eta_k \mu_k \left(M_m - \sum_1^k m \right)$$

Ces $\sum m$ sont proportionnels aux $\sum \frac{I}{\mu^2 \eta}$ d'une manière générale m_t ou $\frac{I_t}{\eta_t \mu_t^2}$ est très important par rapport aux autres termes, sauf

Pour les ternes 1 et 2 (rotor et accouplement) qui, par suite de la grande vitesse, représentent parfois $\frac{1}{4}$ et plus de l'inertie totale. Il suffira donc en général de tenir compte de l'inertie du tablier et de l'axe du rotor.

Pour les grands ponts, les installations mécaniques deviennent très importantes. On les groupe dans une cabine ou salle de machines centrale. Lorsqu'elle est sur le tablier, on place avantageusement la cabine au sommet du pont au-dessus du portique central. Le fonctionnaire a une vue excellente sur les bords. On accède à la cabine par échelle.

Généralement la manœuvre est électrique. On emploie le courant continu ou alternatif. En les variations du couple et des vitesses, le courant continu est préférable. Si on a de l'alternatif triphasé, on peut employer le groupe Ward-Leonard, qui comporte un groupe moteur-générateur convertisseur en continu et qui permet, par le réglage de l'excitation de la génératrice continue, de faire varier le couple et la vitesse sans changer la vitesse du moteur triphasé. Ce groupe, par sa masse en rotation, forme aussi plus ou moins volant régulateur. Mais on peut plus simplement employer un moteur triphasé par interposition d'un transformateur oléo-mécanique, type Janney ou Hele-Shaw (voir Descans op. cité). Le dispositif permet toutes les combinaisons de vitesses et de couples à vitesse constante du moteur, la marche à vide du moteur, la limitation de puissance et de vitesse, le freinage automatique et conduit etc. On pourrait aussi employer les transformateurs de vitesse variables à cônes et courroies etc.

D'une manière générale, il faut une manœuvre assez automatisée, avec limiteurs de vitesse, d'effort et de puissance, interrupteurs automatiques de fin de course et freins automatiques, électromagnétiques ou à récupération. Par exemple aussi, la mise en marche automatique du calage en fin de course.

Enfin, la manœuvre de gyration est combinée automatiquement et enclanchée avec les autres opérations dans un ordre déterminé. Par exemple : abaissement des barrières ou fermeture des signaux, et déséclis-

=sage, puis déverrouillage, décalage, et basculement ou soulèvement du pivot, puis rotation et arrêt. A la fermeture, les opérations se reproduisent en sens inverse. Les appareils de calage, les verrous etc sont commandés par des dispositifs analogues à ceux de gyration. Il est bon d'éviter les longs arbres et de placer les moteurs à proximité des appareils à commander.

§ 14. Quelques types spéciaux de ponts tournants

On a cherché à éviter les sujétions résultant de la continuité du pont sur appuis multiples et, pour les ponts symétriques, on a articulé les membrures supérieures au portique central, les membrures inférieures étant interrompues au droit du même portique. En position fermée, on a deux demi-ponts reposant chacun sur deux appuis. Pour reculer, on soulève le pivot, ce qui met la membrure supérieure sur la pile de pivot sous tension et dégage les appuis de rive, ou bien, on raccourcit les membrures supérieures sur la pile de pivot au moyen de verins hydrauliques ou à vis comme dans les grues à flèches d'inclinaison variable. Ces systèmes sont compliqués et peu économiques; les progrès réalisés dans les dispositifs de calage et de manœuvre suppriment l'intérêt de ces discontinuités.

D'autres dispositifs déjà cités sont les ponts anglais à double voilé travaillant en position fermée comme arc à trois rotules. La pile de pivot doit avoir au niveau des appuis de naissance un parement cylindrique pour permettre la rotation des naissances de l'arc.

Dans les grands ponts, on a parfois des dispositifs spéciaux évitant l'ouverture totale du pont pour le passage de bateaux à faible tirant d'eau.

Au bassin de la Yoliette à Marseille, on fait osciller le pont en soulevant le pivot par verin hydraulique. Il existe un pont à Liverpool à double voilé dont la partie central du tablier forme double pont levé. Ces dispositions sont exceptionnelles et n'ont pas fait école.

Enfin le pont grue est une espèce de pont tournant sans culasse qui se meut par rotation autour d'un axe vertical comme une grue.

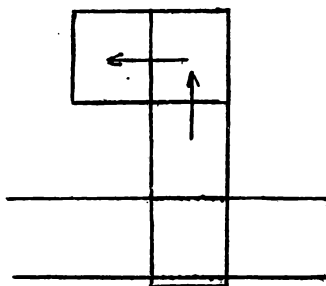
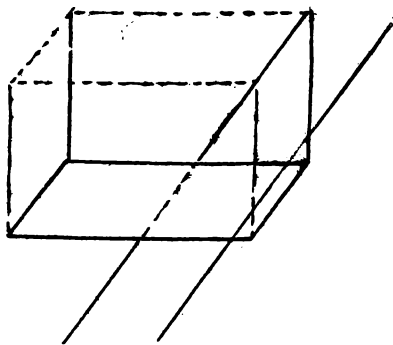
potence. L'axe doit donc être ancré à la partie supérieure par un collier. Pour simplifier le raccordement du tablier avec la culée, on dispose l'axe à l'un des coins du tablier. (Voir pont de Sing-Sing, New-York). L'ancrage de l'axe peut être remplacé par une suspension par câbles de l'extrémité tournante de la volée à un pontique disposé sur la rive du pivot.

Chapitre V

Ponts mobiles à translation et divers

§ 1. Ponts roulants.

Les ponts roulants ont une translation horizontale. Sa translation peut être transversale si le pont présente un biais assez fort par rapport à la voie d'eau. Le plus souvent la translation est longitudinale.



On peut combiner les deux dispositifs. On établit sur la rive un tablier à translation transversale qui se déplace tout d'abord. Le tablier couvrant la voie d'eau vient occuper par trans-

lation longitudinale l'espace libéré par le précédent. Ce mouvement se fait ainsi sans soulèvement et d'autre part le tablier ne présente pas de différence de niveau par rapport à la chaussée fixe. Mais l'espace nécessaire est grand.

Dans les dispositifs à translation longitudinale, s'il n'y a pas de soulèvement, il y a nécessairement une dénivellation entre le tablier et la chaussée à l'extrémité roulante. On la rachète en munissant le tablier d'un escalier ou d'un dos d'âne s'il s'agit d'une passerelle. Ou bien on dispose un tablier de jonction rabattant, que l'on abaisse avant l'ouverture et au dessus duquel se déplace alors le tablier mobile.

La vraie solution consiste à soulever d'abord le pont par un verin (Pont de l'écluse de Kattendyk à Anvers, à verin hydraulique).

Les ponts roulants doivent avoir une culasse d'équilibrage. Au pont de Hattendyke, pour une ouverture utile de 27,50 m, la culasse mesure près de 19 m. ; elle recouvre un encastrement de même longueur contenant les mécanismes et l'encombrement est donc grand. En position ouverte, le pont est en porte à faux sur la longueur de la solee et repose sur deux appuis roulants de culasse. En position fermée, il est sur trois appuis. Au contraire, le pont roule sur des rouleaux placés dans la voie, ce dispositif est defectueux. Il vaut mieux que le pont porte ses galets roulant sur un chemin de roulement en rails ou tôles.

Les efforts de manoeuvre comportent le soulèvement (voir ponts levants et ponts tournants), ensuite le roulement, qui dépend du poids et de la résistance au roulement.

Un dispositif très particulier est celui du pont de Victoria sur la Dée (Angleterre). Le pont est à deux solees roulant dans l'intérieur de deux travées d'approche fixes à tablier supérieur. Il n'y a donc pas soulèvement de tout le pont, mais le platelage doit être abaissé pour passer sous le tablier des travées fixes. A cet effet on a rendu le platelage mobile par oscillation autour de biellettes. Ce mouvement demande peu de fatigue si le tablier est léger et mince (madriers en bois sur poutrelles)

Hincliffe, inventeur des portes roulantes d'écluses, a appliqué le même principe à un pont de Greenock. Le pont comporte une charpente élevée prenant appui sur le fond de la voie d'eau, aménagé en chemin de roulement. En position fermée, on abaisse le tablier par basculement autour de bielles et on retire tout le pont dans une vaste chambre ménagée sous la chaussée, qui est donc portée par de fortes poutrelles.

Les dispositifs de ponts roulants sont presque tous d'origine anglaise. Il y a encore d'autres types, notamment dans lesquels les solees sont appuyées vers le milieu sur des balanciers articulés au pied de la culée et qui accompagnent les solees dans leur mouvement en les soulevant de la quantité nécessaire.

§ 2. Ponts transbordeurs.

Les ponts transbordeurs comportent un pont fixe sur piles métalliques établies sur les deux rives et réservant un tirant d'air suffisant pour le passage des bateaux (20 à 45 m. dans les ports de mer). En cas de grande portée, on peut éventuellement prévoir des piles intermédiaires, mais elles doivent avoir la forme de portiques complètement dégagés dans l'intérieur. Le passage d'une rive à l'autre est assuré par un transbordeur ou nacelle constitué d'un élément de tablier suspendu par une charpente à un truck mobile roulant sur le pont supérieur. Le passage est donc discontinu, c'est en somme la voie d'eau qui est toujours libre, sauf lors du passage intermittent et rapide du transbordeur. Le grand inconvénient du système réside dans cette faible capacité de trafic, malgré le prix élevé de construction d'un véritable pont fixe, plus des mécanismes et la nacelle.

Le pont comporte donc toujours deux portiques d'appui très élevés, dans le calcul desquels les efforts du vent prennent une importance exceptionnelle. Il faut donc un enfoncement considérable. Le pont est un pont fixe. Ce peut être un pont à poutres triangulées à libre dilatation ou, plus souvent, formant portique avec les piles. Parfois aussi la poutre est en porte à faux de part et d'autre des piles. Le système peut être alors statiquement déterminé en ancrant ces porte à faux par des câbles et en introduisant deux joints dont un, à dilatation, dans la travée centrale. Très souvent aussi, même le plus fréquemment, on emploie des ponts suspendus à poutre de rigide dite, dont les câbles sont ancrés en arrière des piles et comportent ou non des porte à faux. Il faut qu'on ait accès au pont par les piles et qu'il porte une passerelle de circulation. La suspension de la nacelle, rigide en charpente ou souple par câbles métalliques; les dispositions du truck et des voies de roulement, les dispositifs de manœuvre et d'accostage etc. sont des points très spéciaux qui sortent du cadre d'un cours; je renvoie à l'étude très complète de M. W. W. Zamen, Descans et Rimbaut dans les A. T. P. B., 1912 fasc. 5.

§ 3. Ponts de bateaux.

Les ponts de bateaux se rencontrent encore sur des cours d'eau importants. Bien que toute l'étude en réside dans les détails, il est utile d'en dire quelques mots. Selon l'importance et la nature de l'ouvrage, on emploie des flotteurs en troncs d'arbre ou fûts cylindriques métalliques pour les passerelles, et des barques ou pontons en bois ou métal pour les ponts. L'emploi de flotteurs en béton armé se recommande; il faut employer un dosage ou des produits assurant une étanchéité parfaite. La portée est variable. Avec les anciens éléments en bois, elle est faible. Les tabliers métalliques avec grands flotteurs permettent de grandes portées de 10 mètres et davantage. Le déplacement des pontons doit être tel que les charges mobiles ne produisent pas d'enfoncement trop considérables, ni d'oscillations. Les tabliers peuvent être continus, mais l'articulation paraît préférable si les portées sont un peu grandes.

Un point important est l'amarrage des pontons, qui doit se faire vers l'amont pour empêcher la dérive, et vers l'aval pour empêcher le déplacement latéral. Si le tirant d'air doit rester libre, on peut employer des ancres ou corps morts ou des ancrages aux rives par cables obliques. Sinon on peut tendre des cables d'amarrage tendus entre les deux rives, auxquels les pontons sont attachés par des cables analogues aux tirants de ponts suspendus. Il est bon d'entretoiser les pontons entre eux par chaînes ou cables. Un autre point important est celui des fluctuations de niveau, que suit le tablier. Le raccordement avec la chaussée se fait par un tablier oscillant, qui doit être d'une portée suffisante pour que la pente ne soit pas trop forte; au maximum 7% pour les ponts routes et jusque 3,5% un pont de chemin de fer de Wobau (Rhein) dans ce dernier pont, qui comporte un pont route et un pont de chemin de fer sur les mêmes supports, la rampe mobile a 64 m. de longueur pour une dénivellation max. de 5,10 m. Cette rampe est supportée par des chevalets intermédiaires avec verins à vis pour le pont de chemin de fer, palans et appuis à broches

pour le pont route.

Si le pont doit permettre la navigation, il comporte des travées mobiles ou portières qu'on laisse dériver en aval du pont en filant sur les câbles d'ancrages et qui s'efface devant la partie restée en place du pont. La portière se remet en place en halant par un treuil sur les câbles d'amarrage. Ce dispositif est simple mais de manoeuvre difficile ; il est préférable de prévoir une travée tournante autour d'un pivot fixé à un ponton spécialement aménagé. La rotation peut se faire par une hélice fixée au ponton de l'extrémité tournante de voles.

§ 4 - Comparaison des systèmes de ponts mobiles

Les ponts levants sont avantageux pour les petites portées et les faibles levages.

Les ponts basculants conviennent dans tous les cas, les efforts de manoeuvre sont minimales en absence de vent. Ils ont un succès croissant. Les ponts à poutre à flèche conviennent très bien pour les petites portées.

Les ponts tournants ont comme avantage la facilité de manoeuvre ; ils conviennent bien pour les grandes portées et les doubles passes navigables ; en dehors de ce cas ils sont encombrants.

Les ponts transbordeurs conviennent aux très grandes portées et aux voies navigables très fréquentées : estuaires, chenaux de grands ports etc.
