

Art. 23. — RESPONSABILITÉ DU PERMISSIONNAIRE.

Nonobstant l'observation des prescriptions du présent arrêté et de l'arrêté d'autorisation spécial à chaque installation, le permissionnaire reste seul responsable des dommages causés aux personnes ou aux biens par l'établissement, l'entretien ou l'exploitation de son installation.

Paris, le 30 mars 1904.

*Le Ministre du Commerce, de l'Industrie,
des Postes et Télégraphes,*

G. TROUILLOT.

FLEXIONS DES PAROIS

dans les tuyaux de conduite de grand diamètre (1)

Dans les calculs d'établissement des conduites de grand diamètre, il y a lieu de se préoccuper des effets des forces qui tendent à altérer la forme circulaire primitive de la section, et qui peuvent ainsi déterminer des fatigues importantes dans les parois, par suite des flexions qu'elles produisent.

Pour les conduites forcées, les forces déformatrices à envisager se réduisent généralement à deux, dans la pratique : le poids propre des parois, et le poids du liquide contenu. Elles tendent à ovaliser les conduites en les aplatissant contre les fondations résistantes sur lesquelles elles s'appuient.

Nous avons déjà donné dans cette revue une analyse des effets de ces forces, pendant la période du remplissage, dans le cas d'une canalisation reposant sur une fondation plane (2).

Ce mode d'appui, suivant la génératrice inférieure de la conduite, est évidemment celui qui correspondra aux plus grands efforts des flexions, car les parois sont libres dans leurs déformations suivant toute la circonférence. Nous avons montré, par quelques applications numériques, que les fatigues moléculaires dues aux flexions peuvent être bien plus importantes que celles qui sont dues à la pression intérieure du liquide considérée isolément (*Génie Civil* des 13 et 20 décembre 1902).

La partie inférieure du tuyau est de beaucoup la plus fatiguée, aussi y a-t-il un très grand intérêt, dans la pratique, à appuyer la canalisation suivant une zone d'une certaine largeur. C'est ce qu'on fait d'ailleurs, le plus généralement, pour les conduites de grand diamètre, que l'on dispose sur des fondations épousant la forme circulaire des tuyaux. Les parois sont alors mieux soutenues, et les flexions en sont atténuées.

C'est ainsi que la conduite de Champ, de 3^m30 de diamètre, repose sur toute sa longueur dans un berceau continu en béton, qui embrasse toute la demi-circonférence inférieure et s'élève jusqu'à 0^m50 au-dessus du plan diamétral horizontal. Cette canalisation est en béton armé dans sa partie amont, et en tôles dans sa partie aval, les épaisseurs varient de 7 mm. à 10 mm.

Indépendamment de toute considération d'économie, il est rationnel d'adopter le ciment armé pour la partie amont des conduites de grand diamètre, car les parois sont alors plus rigides, par suite de leur épaisseur, et beaucoup plus grandes qu'avec la tôle. Vers l'aval, au contraire, les pressions intérieures étant plus fortes, les épaisseurs de tôle auxquelles conduisent les calculs ordinaires seront généralement assez grandes pour que les parois aient une rigidité suffisante. Le calcul des efforts secondaires dus aux flexions permettra de fixer, d'une manière rationnelle, les longueurs respectives des parties en ciment armé et en tôles. Enfin, même pour les conduites établies entièrement en ciment armé, il est utile de calculer les fatigues dues aux forces déformatrices, qui peuvent n'être pas négligeables, avec les grands diamètres. C'est d'ailleurs l'opinion de MM. de Tedesco et Maurel, dans leur ouvrage sur le ciment armé.

En résumé, nous estimons qu'il sera toujours prudent de contrôler la valeur que peuvent atteindre les efforts secondaires, dans les conduites de grand diamètre, en tôles ou en ciment armé, et quelles que soient les dispositions d'appuis adoptées, car les fatigues qui en résultent pourraient fort bien atteindre une limite dangereuse sans que l'on en soit prévenu en temps utile par des déformations apparentes.

Nous verrons en effet que pour une épaisseur de paroi donnée, les fatigues dues aux flexions varient sensiblement comme les *cubes des diamètres* des conduites.

Si elles peuvent être négligées sans grand inconvénient dans les calculs des canalisations ordinaires, on conçoit dès lors qu'il n'en soit plus de même avec les grands diamètres de conduites que l'on adopte de plus en plus fréquemment, dans les installations hydrauliques des pays de houille blanche.

C'est ce qui nous a engagé à venir exposer ici, d'une manière détaillée, nos recherches théoriques sur cette question des déformations transversales des grosses conduites, qui nous a paru présenter, à l'heure actuelle, un intérêt pratique évident.

Indépendamment de tout calcul, l'expérience a d'ailleurs démontré que cette question des flexions des parois, dans les conduites de grand diamètre, présente souvent plus d'importance que l'on ne serait tenté de lui en attribuer *a priori*.

Car, si les ovalisations de conduites sont rares, on en a observé pourtant d'assez importantes pour être sensibles à la vue, sans qu'il soit nécessaire de procéder à des mesures précises pour s'en rendre compte. On a dû y remédier ensuite par des dispositions appropriées nécessairement coûteuses.

Dans son intéressant article sur l'établissement des conduites forcées (1), M. Auguste Bouchayer, constructeur à Grenoble, rappelle le cas bien connu de cette conduite qui s'est aplatie complètement, lors d'une vidange brusque provoquée par la rupture d'un joint de dilatation. Comme le reniflard d'air était insuffisant, il en était résulté un vide relatif de l'air contenu dans la conduite et c'est l'action de la pression atmosphérique extérieure qui a provoqué cet

(1) Ce sujet a été traité par M. Birault à la Société des Ingénieurs civils, séance du 7 octobre 1904.

(2) Voir *La Houille Blanche*, n° 8, août 1903.

1) Voir *La Houille Blanche*, n° 8, décembre 1902.

aplatissement complet, à l'amont du joint rompu. Cet accident est donc dû en très grande partie à un concours de circonstances accidentelles faciles à éviter, et nous ne le citerions pas ici s'il n'était nécessaire d'admettre, pour l'expliquer complètement, une première ovalisation initiale sans laquelle la pression atmosphérique extérieure serait demeurée sans effet. Cette première ovalisation peut être attribuée, avec assez de vraisemblance, à l'action du poids des parois, et surtout du poids du liquide contenu, et un aplatissement initial, même très faible, suffit pour que la conduite ne puisse plus résister à l'action de la pression extérieure.

Il y a d'ailleurs lieu de remarquer que lorsqu'une conduite est en charge, l'action de la pression intérieure est plutôt bienfaisante à cet égard, car elle tend à rétablir la forme circulaire que les forces déformatrices viennent altérer.

C'est ce qui explique que la période de remplissage d'une conduite soit la période délicate, au point de vue des ovalisations et déformations des parois, et c'est à ce moment qu'il convient le plus d'en faire une observation attentive.

On a pu ainsi remédier en temps utile aux déformations observées lors de la mise en charge d'une conduite de 2^m50 de diamètre, établie pour l'usine des Clavaux dans l'Isère.

Cette canalisation en tôles rivées, de 1000 mètres de longueur environ, a une épaisseur de 6^{mm}5 à l'origine et 13^{mm}5 au collecteur, la hauteur de chute étant de 42 mètres. Elle est disposée sur des massifs de supports isolés, en maçonneries.

Ces derniers pénétrèrent dans la conduite, lors de la mise en charge. Aussi commença-t-on par doubler les dimensions des appuis, tandis que l'on augmentait d'autre part la rigidité des parois par des armatures transversales en fers à U qui s'opposaient aux déformations.

A la suite d'une deuxième mise en charge on fut amené à disposer dans l'intervalle d'autres armatures formées de deux montants en fers à H réunis par deux tirants.

Dans ces conditions, la conduite s'est comportée d'une manière satisfaisante, mais ces données de l'expérience sont très intéressantes, par les indications générales que l'on en peut tirer :

Nous en concluons qu'il est préférable de faire reposer des canalisations en tôles minces de cette importance sur des fondations continues, toutes les fois que les circonstances locales le permettront, afin d'éviter les déformations au droit des appuis. Ces fondations épouseront la forme circulaire du tuyau sur une largeur plus ou moins grande, et l'on raidira au besoin les tôles par des armatures transversales plus ou moins rapprochées.

Nous donnerons la préférence aux armatures rapprochées, afin de n'avoir pas de déformations longitudinales sensibles entre deux armatures successives.

Si les armatures transversales sont très voisines, il peut y avoir intérêt à n'appuyer la canalisation qu'en ces endroits, les dispositions du massif de fondation étant étudiées en conséquence. Dans ce cas il sert simplement d'appui aux armatures, sa surface peut donc être plane et discontinue.

Enfin si les conditions locales imposent une solution par appuis espacés, on disposera en ces endroits des armatures

transversales robustes, les tôles étant raidies par des armatures longitudinales, dans l'intervalle de deux armatures transversales successives.

L'étude des flexions des parois sous l'action des forces déformatrices permettra de choisir dans chaque cas, avec sécurité, la solution la plus avantageuse.

Les canalisations en tôles minces d'acier doux, sans armatures, sont celles dont les parois sont le plus flexibles. Elles se trouvent cependant renforcées tout naturellement, et d'une manière très efficace, par les cercles de recouvrement des viroles successives qui les composent.

Les déformations étant inversement proportionnelles aux moments d'inertie des parois, la rigidité de deux tôles rivées l'une sur l'autre est huit fois plus grande que celle de chacune des tôles considérée isolément.

Les cercles de recouvrement sont donc des zones très rigides par rapport aux tôles voisines et ils constituent de véritables armatures transversales, dont il est permis de tenir compte dans les calculs de résistance.

Dans son article sur les conduites forcées, M. Bouchayer cite même l'exemple d'un important projet de conduite forcée où l'on proposait d'augmenter la zone de recouvrement des viroles et d'y mettre une double rivure, afin de donner plus de rigidité aux parois, en les armant simplement par les cercles de recouvrement.

Il indique également divers dispositifs employés par sa maison, joints à brides en fers cornières formant jonction des tronçons entre eux, ou armatures disposées dans la partie couvrant des tronçons.

Nous procéderons maintenant à la détermination des formules théoriques correspondant aux diverses dispositions d'appuis usitées dans la pratique.

Nous donnerons ensuite une représentation graphique très simple de ces formules, ce qui nous permettra d'analyser plus aisément les résultats obtenus, dont nous donnerons quelques applications numériques.

Enfin nous terminerons par les conclusions générales que l'on peut tirer de cette étude, au point de vue pratique.

DÉTERMINATION DES MOMENTS DE FLEXION DANS LES PAROIS SOUS L'ACTION DES FORCES DÉFORMATRICES

Les fatigues des parois sous l'action des forces déformatrices se déduiront de la connaissance des moments de flexion dus à ces forces, en chaque point de la section.

Les formules qui donnent les moments de flexion dans les parois seront différentes, suivant les dispositions adoptées pour les appuis.

Les conduites peuvent être appuyées d'une manière *continue* sur toute leur longueur ou reposer sur des *appuis isolés* disposés de distance en distance.

Pour des canalisations de grand diamètre le premier mode est préférable, car on évite les effets des flexions longitudinales entre appuis, et l'on n'a plus à se préoccuper que des flexions transversales.

Nous étudierons donc tout d'abord la disposition par appuis continus, et nous verrons ensuite par une application numérique comment on peut utiliser les résultats de cette étude dans le cas des appuis discontinus.

Nous rechercherons d'abord la forme générale sous

laquelle vont se présenter les formules des moments de flexion dans les parois, sous l'action des forces déformatrices :

Soit M_p le moment de flexion dû au poids propre de la paroi, en un point quelconque dont la position sera définie par l'angle au centre α du rayon vecteur correspondant avec un rayon fixe pris comme origine.

Ce moment sera évidemment proportionnel au poids p de la paroi, par mètre courant mesuré suivant la circonférence (p sera le poids de paroi au mètre carré si nous raisonnons sur une longueur de tuyau égale à un mètre).

Soit R le rayon de la canalisation.

Les forces verticales élémentaires agissant aux différents points de la paroi seront proportionnelles également aux longueurs des éléments de circonférence, donc à p et à R , et les moments seront par suite proportionnels à p et à R^2 .

Nous pouvons donc poser :

$$M_p = p R^2 Z$$

Z étant une fonction trigonométrique de l'angle α , fonction dont la forme dépendra du système d'appuis considéré.

Soit M_f le moment de flexion dû au poids du liquide contenu. Les forces élémentaires normales aux parois sont proportionnelles au poids δ de l'unité de volume du liquide (dans le cas de l'eau $\delta = 1000$) et au carré du rayon R de la conduite, car elles sont proportionnelles à la fois aux longueurs des éléments de circonférence et aux distances verticales au plan tangent supérieur de la section circulaire.

Les moments de flexion seront donc proportionnels à δ et à R^3 .

$$\text{Si nous posons : } M_f = \frac{1}{2} \delta R^3 Z$$

nous démontrerons que la fonction trigonométrique Z est identique à celle qui correspond au poids des parois, pour les divers systèmes d'appuis usités dans la pratique. Nous pourrions traduire cette loi ainsi qu'il suit :

THÉORÈME I. — *En chaque point de la paroi, les moments de flexion dus au poids propre et ceux qui sont dus au poids du liquide contenu sont proportionnels.*

Cette relation est loin d'être évidente *a priori*, car les forces agissant sur les parois sont de nature essentiellement différentes, dans les deux cas. Les unes sont des forces verticales parallèles, d'intensité constante, les autres sont des forces normales dont l'intensité varie pour chaque élément de la paroi.

Il en sera de même pour les efforts tranchants, qui sont les dérivés des moments de flexion. Il n'y a que les efforts normaux qui sont différents pour les deux groupes de forces.

Quoi qu'il en soit de l'intérêt théorique que peut présenter la loi de proportionnalité des moments fléchissants, il n'y aurait pas lieu de s'y arrêter davantage, s'il n'en résultait une très grande simplification dans les formules pratiques auxquelles nous serons conduits.

Nous allons pouvoir écrire en effet :

$$\frac{M_p}{p R^2} = \frac{M_f}{\frac{1}{2} \delta R^3} = Z$$

Et en admettant des déformations élastiques assez faibles pour que la loi générale de superposition des efforts soit exacte, l'expression du moment de flexion total M , sous l'action des forces déformatrices, sera donnée par la formule :

$$M = M_p + M_f = (p R^2 + \frac{1}{2} \delta R^3) Z$$

Dans la pratique le terme $p R^2$ est généralement faible par rapport au coefficient $\frac{1}{2} \delta R^3$, et c'est l'action du poids du liquide qui est prépondérante. Elle varie proportionnellement aux cubes des rayons. Ainsi que nous l'avons remarqué précédemment, l'action des forces déformatrices sera donc surtout importante pour les grosses canalisations, et nous voyons que les flexions augmentent avec une très grande rapidité, lorsque les diamètres augmentent. Pour un diamètre double les moments fléchissants seront près de 8 fois plus grands.

Dans le cas de tuyaux sans armatures, avec une épaisseur de paroi constante e sur toute la circonférence, les fatigues dues aux flexions sous l'action du poids du liquide seront proportionnelles aux moments de flexion et inversement proportionnelles aux moments d'inertie, soit finalement, proportionnelles au rapport $\frac{R^3}{e^2}$.

Lorsque l'on calcule les épaisseurs d'après les pressions intérieures seulement, on est conduit à adopter des épaisseurs proportionnelles aux diamètres des conduites.

Nous voyons que les épaisseurs doivent croître plus rapidement, pour que les coefficients de travail dus aux flexions demeurent constants.

Si l'on néglige l'action du poids propre des parois, on trouve que la progression correspondant à cette condition devrait être la suivante :

R	1	2	3	4...
e	1	2,83	5,19	8...

ces épaisseurs seraient un peu fortes, si l'on tenait compte du poids des parois et de la pression intérieure. Nous ne les donnons d'ailleurs qu'à titre d'indication, car il sera généralement préférable de renforcer les parois par des armatures, ou par des dispositions d'appuis bien étudiées, plutôt que d'en augmenter la rigidité par des majorations d'épaisseurs, lorsque les flexions deviennent importantes.

La formule générale des moments de flexion nous permet également de nous rendre compte de l'influence des diamètres sur la grandeur des déformations. Le rapport de leur valeur au rayon mesurera ce que nous pourrions appeler la *déformabilité* des conduites.

Les déformations sont proportionnelles aux moments de forces fictives élémentaires appliquées en chaque point des parois, et dont l'intensité, par unité de longueur de paroi, est proportionnelle elle-même aux moments de flexion, et inversement proportionnelle aux moments d'inertie.

Par suite les déformations seront proportionnelles au rapport $\frac{M R^2}{I}$,

I étant le moment d'inertie de la paroi, supposé constant pour toute la circonférence.

Comme pour les moments de flexion, ce sera donc encore l'influence du poids du liquide qui sera prépondérante.

Si l'on néglige l'action du poids des parois, on voit que les déformations sont proportionnelles à $\frac{R^5}{I}$, c'est-à-dire à la 5^e puissance du rayon si les moments d'inertie ne changent pas.

La déformabilité des conduites serait donc proportionnelle à la 4^e puissance du rayon, et inversement proportionnelle aux moments d'inertie des parois.

Pour des tuyaux sans armatures, d'épaisseur constante e , la déformabilité est proportionnelle à $\frac{R^4}{e^3}$.

Tous ces résultats seraient peu modifiés, si l'on tenait compte du poids des parois.

Si nous considérons maintenant la section transversale circulaire d'une conduite, nous voyons qu'elle peut être appuyée sur sa fondation de diverses manières.

Les principales dispositions pourront être classées de la façon suivante :

I. TUYAU REPOSANT SUR DEUX APPUIS SYMÉTRIQUES PAR RAPPORT A LA VERTICALE.

- α) Appuis simples : 1^o appuis fixes,
 — 2^o appuis mobiles horizontalement,
 — 3^o appuis à réactions radiales,
 — 4^o appuis à liaisons quelconques (cas général) ;
 β) Encastrement sur les appuis.

II. TUYAU REPOSANT SUR UNE FONDATION PLANE.

Appui suivant la génératrice inférieure de contact.

III. TUYAU REPOSANT SUR UNE FONDATION CIRCULAIRE.

- α) Appui suivant une zone inférieure de contact,
 β) Canalisation disposée dans un bureau maçonné.

Dans la réalité les cas ne seront pas toujours aussi nettement tranchés, et il pourra y avoir incertitude pour ranger telle disposition pratique dans l'une ou l'autre de ces catégories. Mais l'étude théorique des cas précis définis par cette classification pourra toujours nous fournir, pour les cas intermédiaires, la valeur des coefficients de travail limite qui ne seront pas dépassés, et c'est une indication suffisante pour la pratique.

(A suivre)

C. BIRAULT,

Ingénieur des Arts et Manufactures.



EXPÉRIENCES EXÉCUTÉES A SÉCHERON sur des courants continus à haute tension

La question du transport de force à grande distance prend une importance de plus en plus considérable, parce que, d'une part, les applications à l'industrie moderne, la traction et l'éclairage, se développent rapidement, et que, d'autre part, les forces motrices hydrauliques situées à proximité des lieux d'utilisation ayant été successivement utilisées, il devient nécessaire de chercher au loin les forces naturelles encore disponibles. C'est ainsi qu'en Suisse, la Ville de Zurich étudie pour ses besoins la captation de

forces qui sont situées à plus de 130 kilomètres du centre d'utilisation. En Egypte même, le Delta du Nil emploie pour les seuls besoins de l'agriculture environ 30 000 chevaux-vapeur, aujourd'hui complètement insuffisants. Au lieu de consommer une quantité énorme de charbon, pourquoi n'utilise-t-on pas les forces colossales du Haut-Nil, totalement perdues jusqu'ici? Simplement parce que la distance qui sépare ces forces des lieux d'utilisation est trop grande pour pouvoir être franchie économiquement par l'emploi des moyens dont dispose l'électrotechnique, c'est-à-dire qu'il faudrait employer des courants de tensions excessives, non encore expérimentées en courant continu.

Pour donner une idée des tensions nécessaires au transport économique de la force, nous dirons que si l'on admet l'emploi du courant continu, et que l'on accepte une perte d'énergie de 10 % en ligne, et un poids de cuivre de 30 kilogrammes par cheval électrique reçu, il faut employer une tension initiale de 4 200 volts pour 10 kilomètres de distance, 42 000 volts pour 100 kilomètres et 420 000 volts pour 1 000 kilomètres. L'emploi de la terre comme conducteur ou comme limitatrice de tension statique, permet de doubler ces distances à égalité de tension, perte et poids de cuivre, ou réduire de moitié ces tensions; au contraire, l'emploi du courant alternatif réduit ces distances, par suite de phénomènes secondaires qui augmentent les pertes en ligne.

Il y avait donc un intérêt considérable à vérifier si les avantages de l'emploi du courant continu persistaient aux hautes tensions. Comme aucune expérience probante n'avait été faite au delà de 25 000 volts, on pouvait se demander si quelques phénomènes insoupçonnés ne se manifesteraient pas lorsque l'on doublerait ou triplerait cette tension, et si le point critique en dessous duquel il faut industriellement rester, ne serait pas atteint plus vite qu'on ne pouvait le penser.

La Compagnie de l'Industrie électrique de Genève, qui exploite les procédés Thury, a entrepris de rechercher comment les isolants usuels se comporteraient avec du courant continu à 70 000 volts.

On a donc couplé en série trois dynamos dont l'une pouvait aisément donner 20 000 volts, et les deux autres 25 000 volts chacune, de telle sorte que l'on a pu disposer d'une tension continue qui a pu être portée jusqu'à 70 000 volts. Chacune des génératrices pouvant donner un ampère au maximum, on disposait ainsi d'un courant de 60 à 70 kilowatts, c'est-à-dire beaucoup plus puissant qu'il n'était nécessaire pour les expériences que l'on avait en vue.

Les essais ont été dirigés surtout dans le but de déterminer dans quelle mesure les isolateurs résisteraient au courant continu vis-à-vis du courant alternatif. Comme l'on possède maintenant beaucoup de données pratiques relatives à l'alternatif, il était intéressant d'établir autant que possible le rapport existant entre ces deux genres de courant, ce qui pouvait permettre de déterminer quelles étaient les tensions alternatives, et par suite à quelles distances de transport l'on pouvait prétendre, à égalité de pertes et de sécurité, avec l'un et l'autre systèmes.

Les expériences ont bien marché et l'on ne peut que regretter leur courte durée, nécessitée par les délais de livraison des machines. Elles ont laissé entrevoir la possibilité d'applications nouvelles et très intéressantes du continu à plusieurs problèmes modernes, tels que la télégraphie sans fil et la fabrication des produits azotés par l'air. M. le professeur de Kowalski, de l'Université de Fribourg, a profité de l'occasion pour exécuter une série d'essais très curieux relatifs à ces deux problèmes et à d'autres expériences, dont il s'est réservé la publication.

Comme terme de comparaison, on a employé du courant alternatif produit par un alternateur spécialement choisi à cet effet. On avait reconnu dans les expériences préliminaires que le courant alternatif du réseau de Genève don-