

UNIVERSITÉ DE LIÈGE

COURS DE CONSTRUCTIONS DU GÉNIE CIVIL

N° 69

L'IMPORTANCE DES EFFORTS SECONDAIRES

PAR

F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège

Extrait du

BULLETIN DU CENTRE BELGE D'ETUDE ET DE DOCUMENTATION DES EAUX.

N° 4, 1949/II, pp. 195-197.

LIÈGE

IMPRIMERIE H. VAILLANT-CARMANNE, S. A., PLACE SAINT-MICHEL, 4

1949

L'importance des efforts secondaires

par F. CAMPUS,

Professeur à l'Université de Liège

Le Centre Belge d'Etudes et de Documentation des Eaux m'a demandé cette communication en fixant non seulement le sujet, mais aussi le titre, que je ne défendrais guère en raison de l'adjectif secondaire, dont il faut généralement se méfier en technique, certainement en construction. Il correspond en règle générale à une notion subjective : on qualifie secondaire ce que l'on n'est pas en mesure d'apprécier exactement. En fait, cette communication établira que les efforts dits secondaires sont principaux pour les grosses canalisations, c'est-à-dire celles dont le diamètre intérieur dépasse 0,50 m, et ce d'autant plus qu'il est plus élevé. Comme il ne paraît pas possible ni opportun, dans le cadre de ces brèves communications, d'entrer dans des développements théoriques, je m'en tiendrai à des faits concrets et d'ailleurs vécus, ce qui est susceptible de conférer à mon exposé un caractère de véracité aussi probant que celui que peut procurer une démonstration mathématique, tout en étant plus au gré des praticiens.

Il y a vingt ans, au début de 1929, feu M. H. Biefnot, directeur-gérant de l'Association intercommunale pour le démergement des communes riveraines de la Meuse en amont de Liège, me demanda un examen d'avant-projet des dimensions de tuyaux en béton armé, d'un diamètre intérieur allant jusqu'à 2,55 m qui, enterrés de 0,30 m seulement au-dessus de la génératrice supérieure, devaient être aptes à supporter les charges :

d'une roue de 10 tonnes (chariot de 40 tonnes à 4 roues),

ou d'un rouleau compresseur de 18 tonnes,

ou d'une voie ferrée normale parcourue par des wagons de 20 tonnes et des locomotives de 50 tonnes de poids total, à 3 essieux.

Eventuellement, une pression hydraulique de 1,5 atm. pouvait s'exercer à l'intérieur du tuyau.

Ces conduites devaient être formées de tronçons de 3 m, réunis par des joints déformables et il fallait en réduire le poids au minimum pour en faciliter la manutention et la pose.

L'étude du problème établit immédiatement la

prédominance des effets de la flexion dans le sens transversal, sous l'effet :

du poids propre ;

du poids de l'eau de remplissage (complet ou partiel) ;

du poids des terres de remblai ;

des surcharges éventuelles ;

enfin, le cas échéant, de la poussée latérale des terres.

Les effets de la pression interne, de l'importance définie ci-dessus, étaient nettement inférieurs aux précédents.

Elle établit aussi l'influence très considérable des conditions d'appuis sur la flexion transversale. L'appui localisé dans la région de la génératrice inférieure, tel qu'il se produit naturellement en absence de précautions spéciales, donne lieu aux sollicitations les plus défavorables. Elles peuvent être considérablement atténuées en écartant les appuis symétriquement de la génératrice inférieure ou bien en répartissant l'appui sur une large zone de part et d'autre de cette génératrice, par exemple dans un angle d'ouverture totale de 90°.

Le calcul des sollicitations hyperstatiques par les méthodes classiques et celui des dimensions et des armatures par les formules du béton armé procurèrent une solution tout à fait satisfaisante du problème. Comme des tuyaux répondant à ces caractéristiques étaient introuvables dans le commerce et eu égard à leur destination spéciale, M. Biefnot décida d'édifier à Sclessin une usine pour la fabrication de ces tuyaux, qui est bien connue, qui existe toujours et qui est restée exemplaire. Il décida également de poser les tuyaux sur des coussinets continus en béton, sauf sous les joints, afin de réaliser des conditions d'appui bien définies et assez favorables. Ces tuyaux ont donné toute satisfaction et fait preuve d'une résistance élevée.

En 1931, mon collègue feu M. F. Hachez, de l'Université de Louvain, directeur général de la Société nationale des distributions d'eau, qui connaissait bien les conduites dont il vient d'être question, me pria d'examiner la question des conduites en fonte de 900 et de 700 mm de diamètre intérieur, pour l'adduction des eaux du Néblon, captées par l'Association intercommunale des eaux

de l'agglomération liégeoise. Un grand nombre de ruptures s'y étaient produites. Ces tuyaux n'avaient été calculés que sous l'effet de la pression hydraulique interne et la pression d'épreuve correspondait, pour l'épaisseur nominale, à des tensions calculées variant de 138,5 à 246 kg/cm². Un faible pourcentage des tuyaux n'avaient cependant pas supporté avec succès cette épreuve anodine de pression, ce qui aurait dû alerter déjà. Les conduites avaient été posées sur le fond des tranchées sans précautions particulières. Eu égard au fond souvent rocheux, l'appui était pratiquement réalisé sur la génératrice inférieure. Le calcul de la flexion transversale relatif à certains tronçons rompus, conformément aux circonstances réelles d'appui et de charge, compte tenu aussi de la pression hydraulique effective, révélait des tensions totales de 1700 kg/cm² dans l'hypothèse de l'épaisseur nominale exacte de 19,5 mm pour les tuyaux de 900 mm de diamètre intérieur. Le taux de rupture de la fonte était ainsi dépassé, ce qui expliquait les ruptures. Les formes de rupture correspondaient d'ailleurs aux effets de la flexion transversale.

Mais sur les coquilles rompues, on relevait des épaisseurs effectives atteignant 17,5, 16,5 et même 14,8 mm. C'est-à-dire que les surfaces cylindriques intérieures et extérieures des tuyaux n'étaient pas concentriques, ce qui se produit assez facilement dans les tuyaux de fonte. Comme la sollicitation par flexion transversale entraîne une forte hétérogénéité de sollicitation et crée des tensions dangereuses très localisées, la pose naturelle des tuyaux, avec leurs variations irrégulières d'épaisseur, distribue les endroits de faible épaisseur suivant les lois du hasard, tantôt aux endroits de forte sollicitation, tantôt ailleurs. Ceci suffit à expliquer les nombreuses ruptures. Elles étaient très généralisées à cause des circonstances aggravantes que voici. La vérification ayant été faite uniquement en vue de la pression interne, l'épaisseur nominale était insuffisante pour les sollicitations réelles de flexion transversale de certains tronçons. Ensuite, le mode de pose sur le fond de la fouille réalisait la sollicitation la plus désavantageuse. Un examen critique de la question montre que le mode d'appui pur et simple sur le fond de la fouille, même égalisé au moyen de gravier ou de sable, est pratiquement équivalent à l'appui linéaire suivant la génératrice inférieure, qui est le plus défavorable.

Il résulte de ces faits, qui sont connus, qu'il est insuffisant de déterminer les épaisseurs en vue des pressions internes seulement et que la pression d'épreuve correspondante est impropre à assurer la sécurité. Cependant, l'épreuve de pression a l'avantage de la commodité, de l'exactitude et elle est usuelle. Dès cette époque, j'ai proposé d'assimiler les tensions supplémentaires de flexion aux effets d'une pression fictive. Ceci conduit à une forte majoration de la pression d'épreuve (par exemple jusqu'à 20 et 25 atm. ou davantage pour des tuyaux de 900 mm de diamètre intérieur), sans permettre de dépasser une tension de sécurité

(p. ex. de 400 à 500 kg/cm²). La pression fictive est à calculer dans chaque cas, compte tenu des conditions d'appui qui seront perfectionnées autant qu'il est possible pour réduire la sollicitation et la pression fictive correspondante. On se rend compte que, puisqu'une petite quantité de tuyaux n'avait pu supporter une pression d'épreuve médiocre, il est probable que la plupart des tuyaux se seraient rompus sous l'épreuve d'une pression fortement majorée, ce qui aurait correspondu à leur rupture en service. Ceci établit que la pression d'épreuve fictive peut garantir efficacement contre le retour des accidents décrits.

La pression d'épreuve fictive ne doit d'ailleurs pas développer des tensions égales à la somme de celles résultant de la pression réelle et des tensions de flexion transversale en service. La limite élastique conventionnelle de l'acier ou la tension de rupture conventionnelle de la fonte sont plus élevées en flexion qu'en traction simple. Ce sont là des phénomènes bien connus qui résultent de l'hétérogénéité de la sollicitation de flexion. Des essais comparatifs effectués dans mes laboratoires en 1934 à la demande des Usines à Tubes de la Meuse, sur des tuyaux en fonte, en acier et en asbeste-ciment, ont établi ce qui suit :

Pour l'acier, on peut admettre pour la tension de comparaison de l'épreuve sous pression interne :

$$\sigma p + \frac{\sigma fl}{2} \text{ et la limiter par exemple à } 1200 \text{ kg/cm}^2$$

pour l'acier doux ordinaire (coefficient de sécurité 2 par rapport à la limite apparente d'élasticité) ou à une valeur plus élevée pour des aciers à plus haute limite élastique.

Pour la fonte, la tension de comparaison peut

$$\text{être prise égale à } \sigma p + \frac{7}{12} \sigma fl \text{ et limitée par exemple}$$

à 500 kg/cm² (coefficient de sécurité 2,8 par rapport à la rupture). Ce coefficient de sécurité, numériquement plus élevé pour la fonte que pour l'acier, ne réalise pas une plus grande sécurité. Il tient compte des plus grandes incertitudes qui affectent la fonte, notamment quant aux dimensions. Le cas échéant, un facteur 3,5 (tension de comparaison limitée à 400 kg/cm²) pourrait être plus prudent.

Il est aisé, connaissant la tension de comparaison, de calculer la pression d'épreuve équivalente, donnant une tension égale. Selon les cas, on obtient des pressions allant jusqu'à 30 et 40 atm.

Les tuyaux en asbeste-ciment sont en général de plus petit diamètre et de plus forte épaisseur relative. La flexion transversale a moins d'importance. Il est possible de calculer les épaisseurs par des tensions de comparaison limitées à des valeurs appropriées.

Les tuyaux en béton armé ordinaires ou du type Bonna, ou encore précontraints, généralement d'assez grand diamètre, seront calculés en tenant compte tant de la pression interne que de la flexion transversale. Sauf pour les tuyaux en béton précontraint, l'épreuve sous une pression de compa-

raison équivalente est moins sûre, à cause de l'hétérogénéité du béton armé, dont il résulte que les sollicitations différentes ne sont pas comparables ni superposables. Le calcul complet, par les méthodes suffisamment perfectionnées usuelles donnera toutes assurances, au même titre que l'épreuve sous pression de comparaison. Cette épreuve, qui peut convenir pour les tuyaux en matériaux homogènes et aussi pour le béton précontraint, exige d'ailleurs aussi un calcul complet pour déterminer la pression de comparaison. Elle confère une garantie réelle. Pour les sollicitations de flexion transversale, on se référera aux méthodes classiques de résolution des systèmes hyperstatiques ou aux formules qui en découlent et qui ont fait l'objet de diverses publications. Par exemple, on trouvera une publication de M. H. Noiroux, ingénieur civil des constructions, A. I. Lg., directeur des travaux de la commune de Seraing-sur-Meuse, à l'époque ingénieur à l'Association intercommunale pour le démergement des communes riveraines de la Meuse dans la région de Liège, dans la *Revue Universelle des Mines* de 1943, n° 4 (Théorie analytique des lignes d'influence des tuyaux circulaires).

On ne peut donc plus, actuellement, se borner à calculer les conduites sous l'effet de la pression interne, sauf pour les petits diamètres. Il faut procéder à un calcul correct et complet des tuyaux, dans lequel les sollicitations de flexion transversale ne sont nullement secondaires lorsque le diamètre devient assez grand. Ce qui précède justifie à suffisance cette opinion.

Il faut insister sur les grandes économies que les conditions de pose adéquates peuvent entraîner. Pour un grand projet français, j'ai pu en 1934 indiquer les dispositions les plus avantageuses, réalisées par des appuis continus linéaires symétriques par rapport à la génératrice inférieure et réalisant des réactions radiales ou verticales. Dans ce dernier cas, le dispositif optimum est réalisé par les appuis aux extrémités du diamètre horizontal, ce qui est possible pour les conduites posées en galerie. Ce mode d'appui présente de nombreuses propriétés avantageuses que je ne puis détailler ici, mais il n'est pas réalisable pour des tuyaux enterrés.

A la fin de la dernière guerre, pour tenir compte de la pénurie de matériaux, l'Association intercommunale de démergement a pu réduire les épaisseurs et les armatures de ses tuyaux sans diminuer leur sécurité par rapport aux dispositions

initiales, en remplaçant le sommier à appui continu suivant un arc de 90° par un sommier à appui suivant deux génératrices assez écartées de la génératrice inférieure (1). Naturellement, la sécurité exige que toutes précautions soient prises pour réaliser les conditions d'appui escomptées. Par exemple, dans le cas du sommier à appui continu, il faut éviter que le rayon du sommier soit supérieur à celui de l'extrados du tuyau, ce qui réaliserait un appui localisé vers la génératrice inférieure. Il est au contraire souhaitable que le sommier ait un rayon légèrement inférieur, ce qui tend à localiser les appuis vers les bords du sommier. Les sommiers doivent être calculés et armés à suffisance pour résister sans rupture et sans déformations excessives aux réactions des tuyaux et à celles du sol.

Est-ce à dire que le problème soit entièrement élucidé. Pour les besoins d'une pratique assurée, certes. Mais des économies supplémentaires, bien que probablement modérées, pourraient encore être attendues d'une meilleure connaissance de l'action du poids et des poussées latérales des terres dans divers cas (en tranchée plus ou moins large et en remblai) et de la répartition des actions des surcharges à travers les terres de couverture. Mais c'est un autre problème.

Dans certains cas, il peut être commode et économique de poser les tuyaux, enterrés ou non, sur des coussinets courts. Il en résulte une flexion longitudinale, qui n'est généralement pas dangereuse, mais à contrôler toutefois par les formules adéquates de la flexion. Il y a aussi une sollicitation transversale qui se compose avec cette flexion mais que l'expérience révèle ne pas être défavorable, ce que le calcul élémentaire confirme. Somme toute, les forces transversales peuvent être considérées comme équilibrées dans chaque section par les tensions d'effort tranchant longitudinal, qui sont assez favorablement réparties dans le sens transversal. Il suffit d'éviter de trop fortes pressions sur les coussinets, moyennant quoi la résistance à l'écrasement est assez grande.

Je n'ai pas eu connaissance d'incidents quelconques concernant des conduites établies selon les considérations exposées ci-dessus, ce qui leur donne la pleine signification de contre-épreuve des accidents survenus à la canalisation en fonte dont il a été question.

(1) Cfr. H. Noiroux, référence précitée.