

VÉRIFICATION DES OUVERTURES

Les ouvertures, parfois appelées «piquages», sont des éléments fonctionnels indispensables sur les appareils chaudronnés.

A part la nécessité de remplir et de vider l'appareil, il faut souvent prévoir d'accéder ou de pouvoir inspecter l'intérieur. On a également besoin d'informations sur l'état du produit contenu : pression, température, niveau, etc.

Les ouvertures d'inspection et d'accès sont définies par la norme NF E 86-100.

Afin de simplifier, nous nous bornerons ici à commenter la vérification des ouvertures dans les viroles cylindriques.

RAPPEL SUR LA DÉFINITION DES ÉPAISSEURS

Le calcul de la virole (voir page 107) donne l'épaisseur minimale nécessaire de la tôle (voir CODAP C1.9.1 et figure C1.9 page C1/6).

Pour diverses raisons (normalisation des épaisseurs des tôles le plus souvent), la plus faible épaisseur réelle possible après corrosion de la virole (donc, théoriquement la veille de ferrailler l'appareil), est la plupart du temps supérieure à l'épaisseur minimale nécessaire. Cette épaisseur est appelée épaisseur utile dans le CODAP, et notée e_u .

Pour vérifier la résistance d'un élément, lorsque des formules ne permettent pas d'en calculer l'épaisseur, on prendra la valeur que le CODAP appelle épaisseur admise (sous-entendu «dont on admet la valeur pour faire le calcul»), et qui sera au plus égale à e_u .

Exemple : dans le séparateur d'huile, on trouve comme résultat au calcul de virole (page 53 de ce dossier) : épaisseur minimale nécessaire 8,9 mm. Le constructeur a choisi une tôle d'épaisseur 14 mm (cote donnée sur les plans), ce qui veut dire que l'épaisseur admise peut être prise égale à 14 - (corrosion + tolérance en moins sur la tôle), soit 10 mm.

LIMITES DU CODE

- On considère que si le diamètre de l'ouverture excède $16 \cdot \sqrt{D_m \cdot e}$ (CODAP C5.1.2.1 page C5/1), l'enveloppe ne se comporte plus comme une virole cylindrique, et il faut donc la dimensionner par d'autres moyens (par exemple chapitre C10 du code : méthodes générales de calcul).

Pour le séparateur, on a $D_e = 750 \text{ mm}$, $e = 10 \text{ mm}$, donc $D_m = 740 \text{ mm}$

$$\sqrt{D_m \cdot e} = 86,02 \text{ mm}$$

$$16 \cdot \sqrt{D_m \cdot e} = 1\,376 \text{ mm}$$

Diamètre de l'ouverture : diamètre intérieur du tube après corrosion, soit :

$$141,3 - 2 \cdot (10 - 3) = 127,3 \text{ mm}$$

La relation est donc vérifiée.

- ☐ A l'inverse, si le diamètre de l'ouverture est inférieur à $0,14 \cdot \sqrt{D_m \cdot e}$, on considère qu'elle n'affaiblit pas l'enveloppe, et on ne vérifie donc pas (CODAP C5.1.4a page C5/5).

Pour le séparateur :

$$0,14 \cdot \sqrt{D_m \cdot e} = 12,04 \text{ mm}$$

Il faut donc vérifier l'ouverture.

- ☐ Afin de ne pas concentrer les affaiblissements de résistance de la virole, le code fixe des distances minimales aux discontinuités de l'enveloppe (CODAP C5.1.2.2 page C5/1).

Pour le séparateur :

$$x - x_0 > \text{MAX} \left((0,2 \cdot \sqrt{D_m \cdot e}), (3 \cdot e) \right)$$

ici : MAX (17,2, 30)

Relation vérifiée.

Lorsqu'il s'agit d'une autre ouverture (ou de plusieurs), il faut vérifier si ces ouvertures sont considérées comme «voisines» par le code : une ouverture isolée peut résister à la pression, alors que la bande de métal entre deux ouvertures (appelée ligament dans le code) peut ne pas résister. Cette vérification fait l'objet du chapitre C5.2 du CODAP et n'a pas été reprise dans le CODAP didactique.

Pour le séparateur, ceci est sans objet.

- ☐ Pour les fonds, le code interdit de réaliser des ouvertures dans la zone de carre considérée comme à risque (C5.1.2.2b page C5/1).

PRINCIPE DE LA VÉRIFICATION D'UNE OUVERTURE

Lorsque l'on crée une ouverture dans une virole, on enlève du métal à l'endroit du trou, lequel métal participait à la résistance mécanique de la virole sous pression. Mais on ne laisse jamais le trou béant : on y soude une tubulure, qui participe à la résistance mécanique de l'ouverture.

Par rapport à l'épaisseur minimale nécessaire de la virole sans ouverture, on a donc le surplus de métal jusqu'à l'épaisseur admise (*dans le séparateur, surépaisseur de 8,9 mm à 10*), et aussi le tube. Ce métal «en plus», ne renforcera pas s'il est trop loin de l'ouverture : on a donc fixé des limites à l'intérieur desquelles on considère que le métal renforce l'ouverture (voir figure C5.1.4b1 page C5/6 et définitions page C5/4) :

- L sur la virole ;
- l sur la partie de tube dépassant à l'extérieur de la virole ;

- l' sur la partie de tube dépassant à l'intérieur de la virole (le tube est parfois arasé pour des raisons fonctionnelles : purge ou vidange complète, introduction de plateaux ou de chicanes dans l'appareil...).

N.B. : il faudra effectuer une vérification pour chaque situation de l'appareil et prendre le cas le plus défavorable.

Pour le séparateur :

□ calcul de L

$$L = k_0 \cdot \sqrt{D_m \cdot e} \quad (\text{page C5/4 et C5/6), graphique C5.1.3}$$

$$d = \frac{127,3}{86,02} = 1,48 \text{ donc } k_0 = 1 \quad \text{Conclusion : } L = 86 \text{ mm}$$

□ calcul de l

$$l = \text{MIN} ((\sqrt{d_m \cdot e_t}), (l_t)) \quad (\text{page C5/4 et C5/6})$$

$$d_e = 141,3 \text{ mm} \quad e_t \text{ corrodé} = 7 \text{ mm} \quad \text{donc } \sqrt{d_m \cdot e_t} = 31,45 \text{ mm}$$

On ne connaît pas l_t mais $l_t > 31,45 \text{ mm}$

Conclusion $l = 31,45 \text{ mm}$

□ calcul de l'

$$l' = \text{MIN} ((0,5 \cdot \sqrt{d'_m \cdot e'_t}), (l'_t))$$

Epaisseur du tube dépassant dans la virole après corrosion : $10 - 2,3 = 4 \text{ mm}$ (l'intérieur et l'extérieur du tube sont corrodés).

$$d'_e = 141,3 - 6 = 135,3 \text{ mm}$$

$$d'_m = 135,3 - 4 = 131,3 \text{ mm}$$

$$0,5 \cdot \sqrt{d'_m \cdot e'_t} = 11,5 \text{ mm}$$

On ne connaît pas l'_t mais $l'_t > 11,5$

Conclusion $l' = 11,5 \text{ mm}$

La surface G du tronçon de virole considéré (voir figure C5.1.4b1 page C5/6), est soumise à la pression du gaz, et subit donc une force égale à $P \cdot G$.

Pour le séparateur :

□ calcul de la surface G

$$G = (L + 141,3 / 2) \cdot R_{i \text{ corrodé}} + (l + e) \cdot d_i$$

$$G = 156,65 \cdot 364 + (31 + 10) \cdot 127,3$$

$$G = 57\,020 + 5\,219$$

$$G = 62\,239 \text{ mm}^2$$

Pour le séparateur en situation normale de service :

□ *effort exercé par le gaz (pression 2,4 MPa)*

$$P \cdot G = 2,4 \cdot 62\,239 = 149\,375\,N = 149,4\,kN$$

Pour que ce tronçon résiste à la pression, il faut que l'effort admissible dans le métal sur les surfaces S et S_t , soit au moins égal à $P \cdot G$ (voir C5.1.4b page C5/5).

Si cela est vérifié, le tube et la virole compensent l'ouverture.

Si tel n'est pas le cas, comme dans le séparateur, il faut «renforcer l'ouverture».

□ *calcul de S*

$$S = L \cdot e \quad \text{soit } S = 86 \cdot 10 = 860\,mm^2$$

□ *calcul de S_t*

$$S_t = (l + e) \cdot e_t + l' \cdot (e'_t)$$

$$S_t = (31,45 + 10) \cdot 7 + 11,5 \cdot 4$$

$$S_t = 336,15\,mm^2$$

□ *effort admissible dans le métal assurant la tenue de l'ouverture*

(relation C5.1.4b2 page C5/5 avec $f = 117,5\,MPa$)

$$(117,5 - 1,2) \cdot (860 + 336) = 139\,094\,N = 139\,kN$$

Conclusion : *pour le séparateur, en situation normale de service, il va falloir renforcer l'ouverture.*

Les solutions d'assemblage non renforcé figurent pages FA1/12 à FA1/15 du CODAP. On peut remarquer que pour la catégorie exceptionnelle et la catégorie A, les assemblages doivent être réalisés à pénétration complète.

Les tubulures dites «posées» (4.1.1 page FA1/12) doivent être préparées à leur extrémité pour épouser la forme de la virole, en plus de la préparation de bord pour le soudage.

Pour les tubulures pénétrantes (4.2 page FA1/14), la préparation de bord est réalisée sur la virole ; la longueur de tubulure dépassant à l'extérieur peut être réglée au montage ; celle dépassant à l'intérieur peut si nécessaire être arasée après assemblage, en prenant la virole comme gabarit.

RENFORCEMENT D'UNE OUVERTURE

Il faut «rajouter du métal» dans la zone où il sera efficace, c'est-à-dire pas au delà des longueurs L sur la virole, l et l' sur le tube.

On pourra donc, soit utiliser un tube plus épais, soit augmenter l'épaisseur de la virole (au moins localement), soit faire les deux dans les cas extrêmes. La liaison à la virole doit être «résistante»

(voir C5.1.2.5a), de manière que le métal participant au renforcement soit parfaitement solidaire de la virole et soit sollicité en même temps.

Tube plus épais

Cette solution a une limite : si le tube est trop épais, il va créer une «raideur locale» et modifier le comportement de la virole. Le CODAP limite donc l'épaisseur du tube à $k_t \cdot e$ (voir C5.1.2.3b page C5/3).

Pour le séparateur : $d/D_m = 127,3 / 740 = 0,17$

donc $k_t = 2$; $e_t =$ épaisseur du tube, doit être inférieure à 20, ce qui est vérifié.

D'autre part, les tubes sont généralement vendus en longueurs de 6 m : la solution n'est pas forcément économique si l'on n'a besoin que de quelques centaines de millimètres, d'autant que ce tube faisant partie de l'enveloppe soumise à pression, il faudra fournir les documents de réception... Par contre, si l'on a plusieurs piquages identiques ou si le tube plus épais est utilisé ailleurs sur l'appareil, la solution devient intéressante.

Virole plus épaisse

Si plusieurs piquages sont situés dans la même zone de la virole, on pourra réaliser un morceau de virole plus épais (pour assembler les épaisseurs différentes bord à bord, il faudra alors satisfaire les recommandations données en F1.3 page F1/2, ainsi que les pages FA1/3 et FA1/4).

Pour une seule ouverture on utilisera la solution de l'anneau renfort (surface S_r sur la figure C5.1.4b1 page C5/6). La largeur d'anneau participant au renforcement sera au maximum L . L'épaisseur de l'anneau sera limitée pour les mêmes raisons que le tube : au plus $1,5 \cdot e$ (voir C5.1.2.5b). Le minimum sera donné par les conditions métallurgiques de soudage. Dans la pratique, on prend chaque fois que possible la même épaisseur que la virole : cela permet de fabriquer l'anneau dans une tôle du même lot que la virole.

Pour le séparateur :

☐ *effort non repris par le métal*

$$149\,375 - 139\,094 = 10\,281\,N$$

☐ *section minimale du renfort*

$$S_r = 10\,281 / (117,5 - 1,2) = 88\,mm^2$$

Pour le séparateur en situation de résistance :

☐ *effort exercé par l'eau (pression 4,08 MPa)*

$$P \cdot G = 4,08 \cdot 62\,239 = 253\,935\,N = 253,9\,kN$$

□ *effort admissible dans le métal assurant la tenue de l'ouverture (voir CODAP C1.7.4 page C1/5 $f = 0,95 R_{t0,002}$ soit $f = 0,95 \cdot 285 = 270,75 \text{ MPa}$)*
 $(270,75 - 2,04) \cdot (860 + 336) = 321\,377 \text{ N} = 321,4 \text{ kN}$

□ *effort non repris par le métal*
 $321\,377 - 253\,935 = 67\,442 \text{ N}$

□ *section minimale du renfort*
 $S_r = 67\,442 / (270,75 - 2,04) = 250 \text{ mm}^2$

Les résultats des deux calculs (88 mm^2 et 250 mm^2) conduisent donc à adopter un renfort de section supérieure ou égale à 250 mm^2 . Le renfort dessiné étant d'épaisseur 8 mm, il doit avoir une largeur minimale de $250 / 8 = 32 \text{ mm}$, ce qui est le cas.

Remarques :

- si d'autres situations étaient recensées, il faudrait refaire le calcul pour chacune d'elles ;*
- en C5.1.2.5, le code prescrit pour le renfort une épaisseur inférieure à $1,5 \cdot e$. Ceci est donc satisfait $8 < 15 \text{ mm}$.*

Les solutions d'assemblage figurent pages FA1/16 à FA1/18 du CODAP. On peut remarquer que pour la catégorie A, les assemblages avec la virole doivent être réalisés à pénétration complète. L'assemblage de l'anneau est complété à sa périphérie par une soudure d'angle. Le rayon de cambrage intérieur de l'anneau devra être ajusté sur le rayon extérieur de la virole. Malgré cela, de l'air ou du gaz peut être emprisonné entre la virole et l'anneau lors de la première passe d'assemblage. Les retraits de soudage peuvent conduire à une réduction importante du volume disponible, et donc à une pression très forte entre anneau et virole, si on ne prend pas la précaution de prévoir un évent pour évacuer le gaz (4.3.1 page FA1/16 et suivantes).

Le code impose des gorges minimales pour les soudures, afin d'assurer une résistance suffisante de l'assemblage.

Il subsiste néanmoins une discontinuité dans le métal entre la virole et l'anneau, aussi exige-t-on un renfort monobloc (le brut est généralement obtenu par forgeage), en catégorie exceptionnelle (4.4 pages FA1/18 et 19).

Remarque importante :

Toutes les surfaces prises en compte pour le calcul de la résistance mécanique du métal autour de l'ouverture doivent être calculées corrosion déduite ; si cette corrosion est seulement interne, on la déduira donc :

- sur la génératrice intérieure de virole ;
- sur la génératrice intérieure du tube ;
- sur la génératrice extérieure du tube pour la partie dépassant à l'intérieur de la virole ;
- sur l'extrémité du tube intérieur à la virole.