

La conception des tuyauteries en composite

Design of piping in composite

B. PITROU (SNCT)

H. MALLARD, L. BOULAY (CETIM)

Résumé

La conception de réseaux de tuyauterie réalisés avec des tubes en matériau composite a été principalement étudiée dans le cas des Centrales Nucléaires suite à l'expérience acquise sur la corrosion des tuyauteries d'eau brute due à l'eau de la rivière. Les solutions inox ou acier revêtues néoprène ne pouvaient satisfaire les contraintes chimiques. Le domaine de fonctionnement imposé vont de -30°C à 120°C , de 8 à 15 bars, des diamètres de 50 à 700 mm. Cela correspond au domaine des solutions composites à base de résine époxy et de renfort en verre E.

La conception de tels réseaux a posé immédiatement des problèmes de critères de dimensionnement, des problèmes dans l'utilisation du code CASE 155-2. La quantification des marges calculées et la prise en compte de l'anisotropie ont toujours été particulièrement soulignées.

Ceci est l'origine directe des études en cours au CETIM dans le cadre d'un groupe de travail spécifique GT4 de la Commission Chaudronnerie. Elles étaient à rapprocher des préoccupations mentionnées dans les réseaux de recherche et d'innovation technologiques (R2IT). «L'objectif est de favoriser une recherche pertinente permettant de lever les verrous technologiques pour le développement en commun de produits et services basés sur de nouvelles technologies.» Une enquête partielle auprès de 20 entreprises, en particulier ayant un type d'activité d'Ingénierie et utilisant l'acier et le composite, réalisée au CETIM en juin 2001 indique que les tuyauteries sont toujours ou partiellement soumises à une pression de fonctionnement significative. Ces entreprises pensent que ces matériaux sont sous-employés à cause de leur coût et du manque de normalisation. Le marché qu'elles estiment oscille entre stagnation et augmentation. Les applications potentielles sont la Chimie, les réseaux d'eau, le Pétrole-Gaz, l'Énergie et l'Environnement. Les matériaux sont en général qualifiés en interne, avec le fournisseur de matériau. Ces entreprises recherchent un code de construction de type CODETI®.

Cet article présente la démarche de dimensionnement des tuyauteries en matériau composite telle qu'elle sera définie dans la division 4 du CODETI®.

Abstract

Composite piping design has mainly been studied in the nuclear industry with experience gained on the corrosion of piping due to river water. Stainless steel or neoprene coating could not resolve the chemical constraints. Operation conditions range from -30°C to 120°C , 8 to 15 bars in pressure, 50 to 700mm in diameter. It corresponds to the scope of E-glass reinforced epoxy composites.

The design of such networks has led to immediate problems of design criteria, problems in the use of code CASE 155-2. The quantification of safety factors and the consideration of anisotropy have always been particularly emphasized.

This is the direct cause of ongoing studies at CETIM within a specific working group WG4 of the Pressure equipment Commission, relating to the concerns expressed in the research and innovation networks (R2IT). "The goal is to promote relevant research to remove the technological barriers for the co-development of products and services based on new technologies." A partial survey among 20 companies, particularly with an Engineering activity and using steel and composite, has been carried out by CETIM in June 2001. It indicates that the pipes are all or partly under significative service pressure. These companies believe that these materials were underemployed because of their cost and lack of standardization. The market oscillates between stagnation and growth. Potential applications are chemistry, water supply network, Off-shore, Energy and Environment. Materials are qualified in-house at the material supplier's premises. These companies require a design code like CODETI ®.

This paper introduces the general design of composite pipes as it will be defined in the Division 4 of CODETI®.

INTRODUCTION

Le grand nombre de combinaisons résine/fibre/procédé possibles rend la normalisation des matériaux composites difficile. La démarche consiste à utiliser plus systématiquement les modèles d'homogénéisation éprouvés pour estimer à partir des caractéristiques des constituants de base, des combinaisons et orientations de couches, les caractéristiques du matériau composite tout en assurant une cohérence essais/modèles/contrôle.

Un verrou technique important actuellement pour les pièces chaudronnées en composite est le surdimensionnement. L'utilisation de coefficients de sécurité élevés empêche toute forme d'optimisation.

L'analyse mécanique des structures en composites, demandant la manipulation d'un grand nombre de variables, exige un lien étroit entre la fabrication, le dimensionnement, les essais de caractérisation, les contrôles, la fractographie. En parallèle des essais "in vivo", des essais "in silico" sont un complément important. La mécanique des composites se traite par une "multi-approche": multi-matériaux, multi-physique, multi-échelles.

ACIER/COMPOSITE

Pour les structures en acier, de façon courante, et certes de façon un peu simplifiée, l'analyse mécanique au niveau de la conception ou bien lors d'analyse de défaillances s'effectue à partir des données suivantes:

- une géométrie définie par des lignes, surfaces, volumes,
- un comportement matériau élastique linéaire, ou élasto-plastique, comportement résumable par quelques données (masse volumique, module d'Young, limites en résistance, dilatations thermiques...), soit un nombre de données de quelques unités dont il existe des valeurs normalisées,
- des conditions aux limites,
- des chargements.

Pour le composite, l'analyse mécanique doit prendre en compte les éléments suivants

- la géométrie est la base pour la dépose des couches, elle se complexifie donc immédiatement par la séquence d'empilement, par les orientations associées, par les épaisseurs constitutives. Toutes choses égales par ailleurs, la donnée géométrique "épaisseur acier", est remplacée par une vingtaine de données épaisseurs, orientations. Notons aussi que la dépose des couches est liée à la géométrie, la dépose d'un tissu sur une surface courbe voit ce dernier se conformer à cette surface, modifiant ainsi localement la donnée initiale,
- le comportement matériau est une donnée à entrer au niveau stratifié, comportement à l'échelle du cm et au niveau des couches à cause de l'hétérogénéité intrinsèque qui oblige à avoir cette donnée de comportement sur une échelle de l'ordre du mm. L'anisotropie vient ajouter des paramètres directionnels au comportement et dans le domaine linéaire, le nombre de données acier est ici multiplié par 3 environ. Il faut y rajouter des problèmes spécifiques comme les propriétés transverses faibles, les dilatations dues à l'humidité. Les matériaux composite ne font pas l'objet de normes harmonisées, la caractérisation est donc un complément à prévoir à la conception. La dispersion des propriétés est un facteur qui entraîne une caractérisation sur un nombre d'éprouvettes de l'ordre de 3 fois plus,
- les conditions aux limites sont proches des données acier, le temps est une composante ajoutant une viscosité ou dérive des propriétés dans le temps plus fréquemment

rencontrée pour les polymères utilisés plus près de leur température limite que les aciers.

- dans le cas du composite, les chargements se combinent, l'analyse en résistance est dépendante des types et chemins de chargement. Un comportement élastique isotrope peut être lié à une résistance limite anisotrope. Les raisonnements d'analyse obligent ainsi à revoir chaque cas de chargement de façon indépendante. Une marge par rapport à la rupture peut être grande, mais un changement de chemin de chargement de quelques degrés peut entraîner une marge de plusieurs ordres de grandeur inférieurs,
- en post-processeur d'analyse, il est difficile de résumer par un chiffre une structure composite, la marge par rapport à la rupture remplacera les contraintes de Von Mises et dépendra du chemin de chargement, la communication des résultats sous forme graphique est lourde, les logiciels ne s'étant pas encore appropriés ces types d'analyse...


Ce paragraphe rappelle les complexités des composites dues au grand nombre de variables et de leurs associations possibles. Le niveau technique d'analyse mécanique reste pourtant du même degré que pour celui de l'acier, la quantité d'informations est grande et elle demande des efforts particuliers.

MATERIAU

Les résines utilisées pour la fabrication des tuyauteries composites sont des résines d'usage général telles que les polyesters, vinylesters ou époxydes. Les données par défaut utilisées dans les modèles sont listées ci-dessous, pour une température de 23°C. Elles sont facilement accessibles en fourniture.

masse volumique	1200 kg/m ³
module d'Young	3200 MPa
coefficient de Poisson	0.37
amortissement en traction	8%
amortissement en cisaillement	8.70%
limite en traction	74 MPa
limite en compression	126 MPa
limite en cisaillement	43 MPa
limite en flexion	104 MPa
dilatation thermique	0.000068 m/m/°C
dilatation hygrométrique (en m/m/(kg d'eau absorbée/kg de matière))	0.39
conductivité thermique	0.2 W/(m.°C)
capacité calorifique massique	1050 J/kg/°C

Les fibres le plus couramment utilisées pour les tuyauteries composites sont les fibres de verre (E,C...). Les caractéristiques par défaut utilisées dans les modèles sont listées ci-dessous.

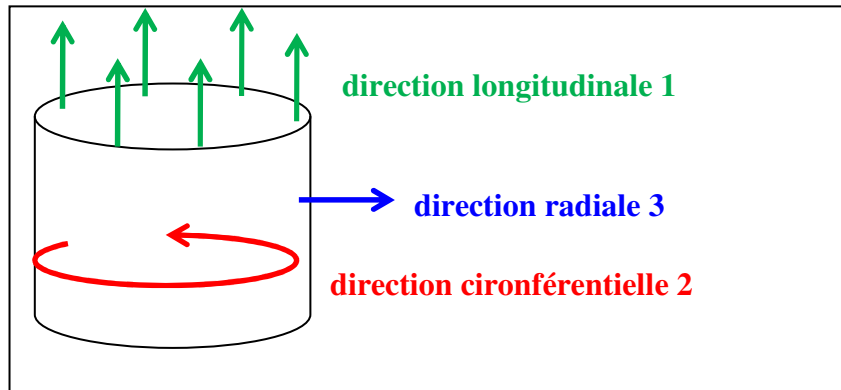
	
masse volumique	2540 kg/m ³
module d'Young	73000 MPa
coefficient de Poisson	0.22
amortissement en traction	0.006
amortissement en cisaillement	0.09
limite en traction	1990 MPa
limite en compression	1200 MPa
limite en cisaillement	1200 MPa
dilatation thermique	5.3e-6 m/m/°C
dilatation hygrométrique (en m/m/(kg d'eau absorbée/kg de matière))	0
conductivité thermique	1.1 W/(m.°C)
capacité calorifique massique	840 J/kg/°C

Les modèles d'homogénéisation permettent de déterminer les caractéristiques de la couche (Unidirectionnelle, mat, tissu) puis du stratifié (enroulement +/-θ, empilement de mat/tissus). Les caractéristiques recherchées sont : les rigidités, les résistances, les transports de chaleur et d'humidité et les dilatations thermiques et hygrométriques.

Les caractéristiques d'un tube réalisé par enroulement filamentaire à +/-55°, avec un taux massique de fibre de 70%, à 23°C sont listées en application dans le tableau ci-dessous. Les caractéristiques mesurées par essai ne doivent pas s'éloigner de plus de 20% des valeurs calculées. L'angle de 55° correspond à l'orientation optimale des fibres vis à vis du comportement à la pression avec effet de fond. Il est admis d'avoir une donnée acier, puis de calculer les propriétés d'une poutre en I ou en U. En composite, il faut admettre que le niveau de base des composites est celui des constituants, pas de la couche et que tout le reste sera ensuite calculable comme cela est admis dans le cas des profilés acier du matériau jusqu'à l'inertie équivalente.

module d'élasticité sens 1	E ₁	9600 MPa
module d'élasticité sens 2	E ₂	16300 Mpa
module d'élasticité sens 3	E ₃	11410 MPa
coefficient de Poisson 12	ν ₁₂	0.44
coefficient de Poisson 21	ν ₂₁	0.74
module de cisaillement 12	G ₁₂	10480 Mpa
module de cisaillement 13	G ₁₃	3900 MPa
module de cisaillement 23	G ₂₃	3600 MPa

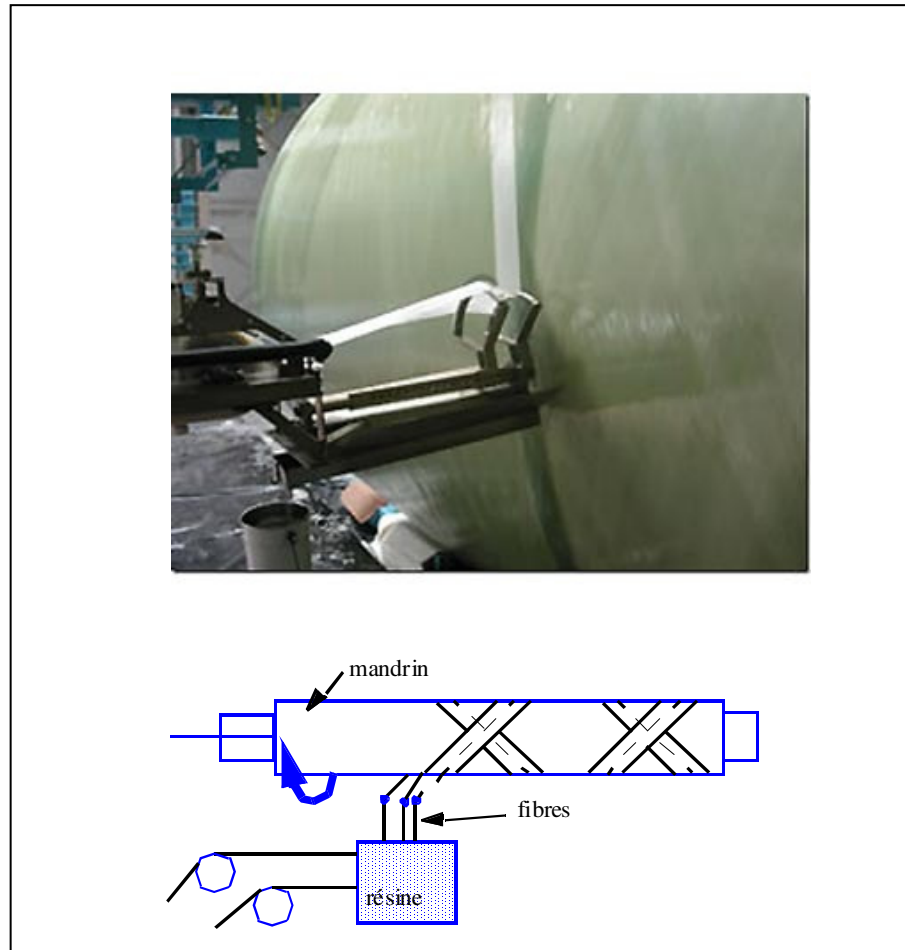
limite élastique sens 1 traction	X	45 MPa
limite élastique sens 1 compression	X'	58 MPa
limite élastique sens 2 traction	Y	87 MPa
limite élastique sens 2 compression	Y'	79 MPa
limite élastique sens 12 cisaillement	S	94 MPa



Le choix des matériaux s'appuie sur un ensemble de propriétés spécifiques aux matériaux composites. Ces propriétés générées par calcul s'obtiennent couramment en fourniture et fabrication. Elles permettent d'assurer les marges de sécurité requises. La garantie de ces propriétés de base est nécessaire pour valider la réalisation d'une tuyauterie en matériaux composites.

FABRICATION

Les tuyauteries composites sont principalement fabriquées par enroulement filamentaire. Elles présentent soit des nappes superposées, soit des croisements de mèches soit des fils continus (Roving) assimilés à un empilement de couches.



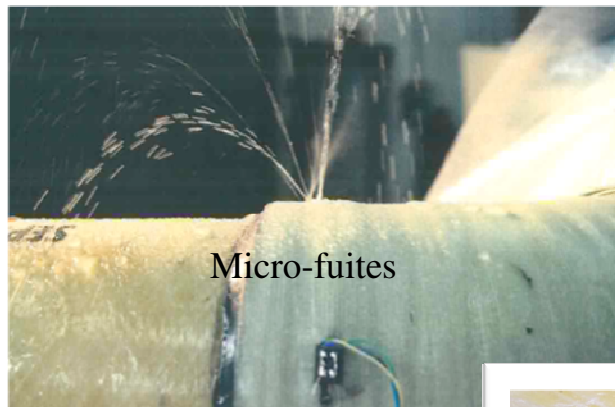
MODE DE RUPTURE

Sous l'effet des sollicitations auxquelles elle est soumise, pour un chemin de mise en charge connu, la défaillance d'une tuyauterie composite peut survenir suivant l'un des modes ci-après :

- micro-fissurations, perlage ou micro-fuites au travers de la paroi, sans dégradation apparente pouvant résulter d'un dépassement des contraintes limites dans le plan des couches ou d'un excès de cisaillement transverse local dû à une discontinuité,
- rupture de type fragile ou ruptures élastiques successives de type fragile par morceaux, - instabilité élastique, locale de paroi, ou générale de structure,
- fluage ou fatigue statique,
- fatigue,
- diminution d'épaisseur travaillante par la reprise d'humidité,
- érosion, usure ,....,

- corrosion, vieillissement,

Pour la rupture d'un empilement de couche, il faut distinguer les premières fissurations de couches, les premières ruptures de fibres et la rupture ou ruine finale. La rupture de la matrice ou de l'interface fibre-matrice est la source de ces premières ruptures. La rupture de première couche est la limite prise en compte quand on n'admet pas de perlage ou de microfissurations si un liner est disposé. Le perlage surviendra en fait au delà de la rupture de première couche dès qu'un chemin continu de microfissures se crée dans l'épaisseur. La première rupture de couche se détecte principalement par émission acoustique. Le critère dit de Tsai-Wu qui sert à calculer cette première rupture est conservatif.



COEFFICIENTS DE SECURITE

Un verrou technique important existant actuellement pour les pièces chaudronnées en composite est le surdimensionnement. Dans les codes existants, des marges de sécurité sont actuellement imposées jusqu'à une valeur de 6 en statique, voire 9 en durabilité. Ils sont issus d'analyse mécanique calquée sur l'acier avec des propriétés isotropes, des critères de rupture de type Von-Mises. Ils sont conservatifs en apparence mais ne correspondent pas à une analyse prenant en compte les spécificités des composites. Ces valeurs empêchent toute recherche d'optimisation et toute comparaison avec d'autres matériaux.

Les coefficients de sécurités utilisés doivent permettre de garantir le même niveau de fiabilité que ceux utilisés pour les tuyauteries métalliques.

Le coefficient de sécurité à utiliser dans les calculs est lié à la durée de vie souhaitée. En situation normale de service, l'objectif est de garantir un coefficient de sécurité minimal de 1.5 pendant toute la durée de vie de l'installation.

Il convient d'utiliser un coefficient de sécurité de 1.5 lorsque :

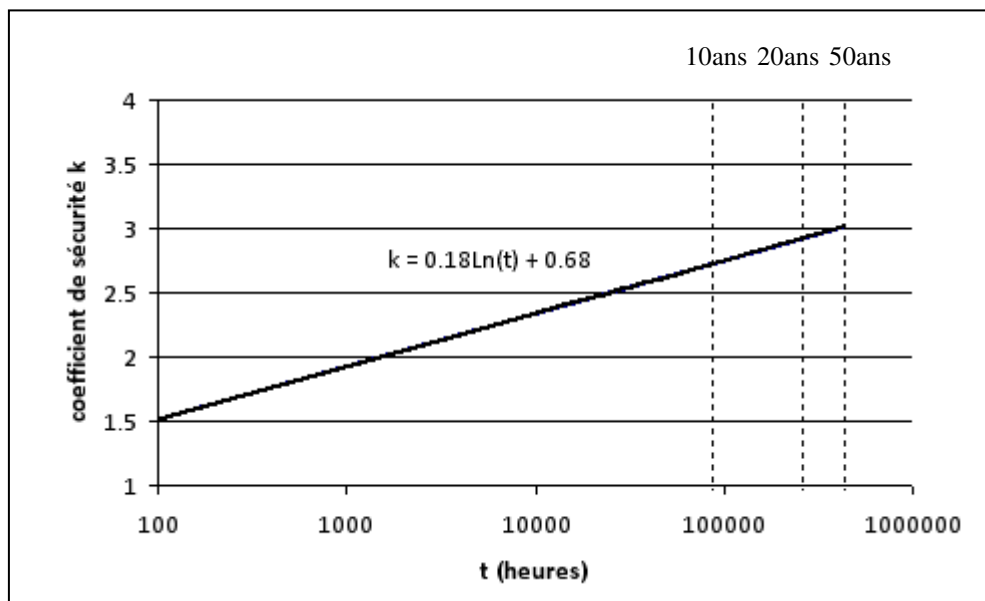
- Les charges sont appliquées sur un temps court (<100h),
- La température est suffisamment basse (<65°C) afin d'éviter une accélération des phénomènes de reprise d'humidité et de fluage,

Dans le cas contraire, si :

- Les charges sont appliquées sur un temps long impliquant du fluage (>100h),
- La température de fonctionnement s'approche de la transition vitreuse accélérant les phénomènes de reprise d'humidité et de fluage,

Alors, pour garantir un coefficient de 1.5 sur toute la durée de vie, il convient d'utiliser un coefficient de sécurité initial intégrant ces phénomènes.

Lorsqu'aucune valeur de résistance à long terme n'est disponible, le coefficient de sécurité est déterminé à partir de la courbe suivante.



D'après cette courbe, l'utilisation d'un coefficient de sécurité de 3 permet de garantir une marge résiduelle de 1.5 au bout d'une durée de service supérieure à 20 ans.

Situation	Caractéristiques mécaniques à utiliser dans les calculs :	Temps court (voir Note 1)	Temps long
Situation Normale	Caractéristiques mécaniques initiales	1.5	3 (Voir Note 2)
	Caractéristiques mécaniques mesurés sur un temps long	-	1.5
Essai de résistance initiale	Caractéristiques mécaniques initiales	1.1	/ (Voir Note 3)
Exceptionnelle ou occasionnelle	Caractéristiques mécaniques initiales	1.1	1.5
	Caractéristiques mécaniques évoluant dans le temps		1.1

Note 1 : Dans ce cas d'utilisation, le Fabricant doit obtenir du Producteur la garantie de durée de vie du matériau par des essais de résistance à long terme (HDB).

Note 2 : Pour conserver un coefficient de 1.5 au court du temps il convient d'appliquer un coefficient lu sur la courbe en fonction du temps d'application de la charge.

Note 3 : Pour l'essai de résistance, il n'est pas nécessaire de vérifier le dimensionnement en conditions de fluage.

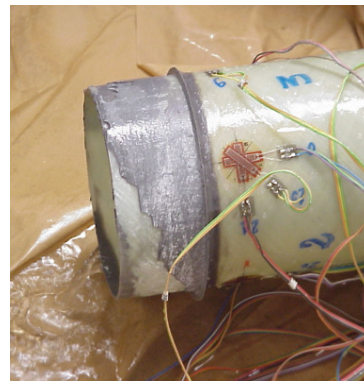
ANALYSE LIMITE - CRITÈRE DE RUINE

Le dimensionnement des tuyauteries composites s'effectue en découplant l'analyse en contraintes planes de l'analyse en contraintes transverses (efforts tranchants) suivant deux critères indépendants.

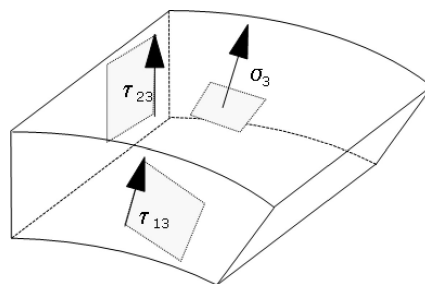
L'analyse en contraintes transverse est réalisée avec un critère de contrainte maximale (en cisaillement et en contrainte normal). Elle est réalisée dans les zones de discontinuités (assemblages, supportages,...) où des contraintes transverses peuvent se développer.



Perlage au niveau d'une jonction

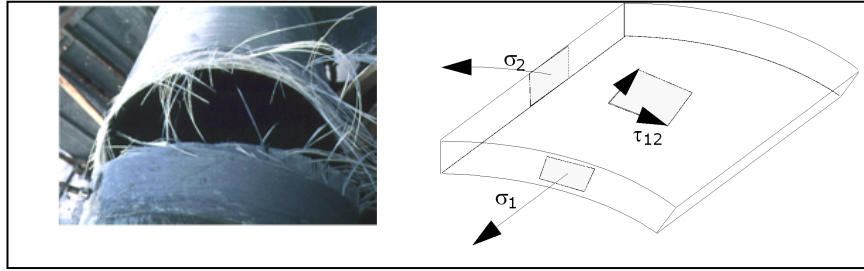


Déboitement au niveau d'un coude



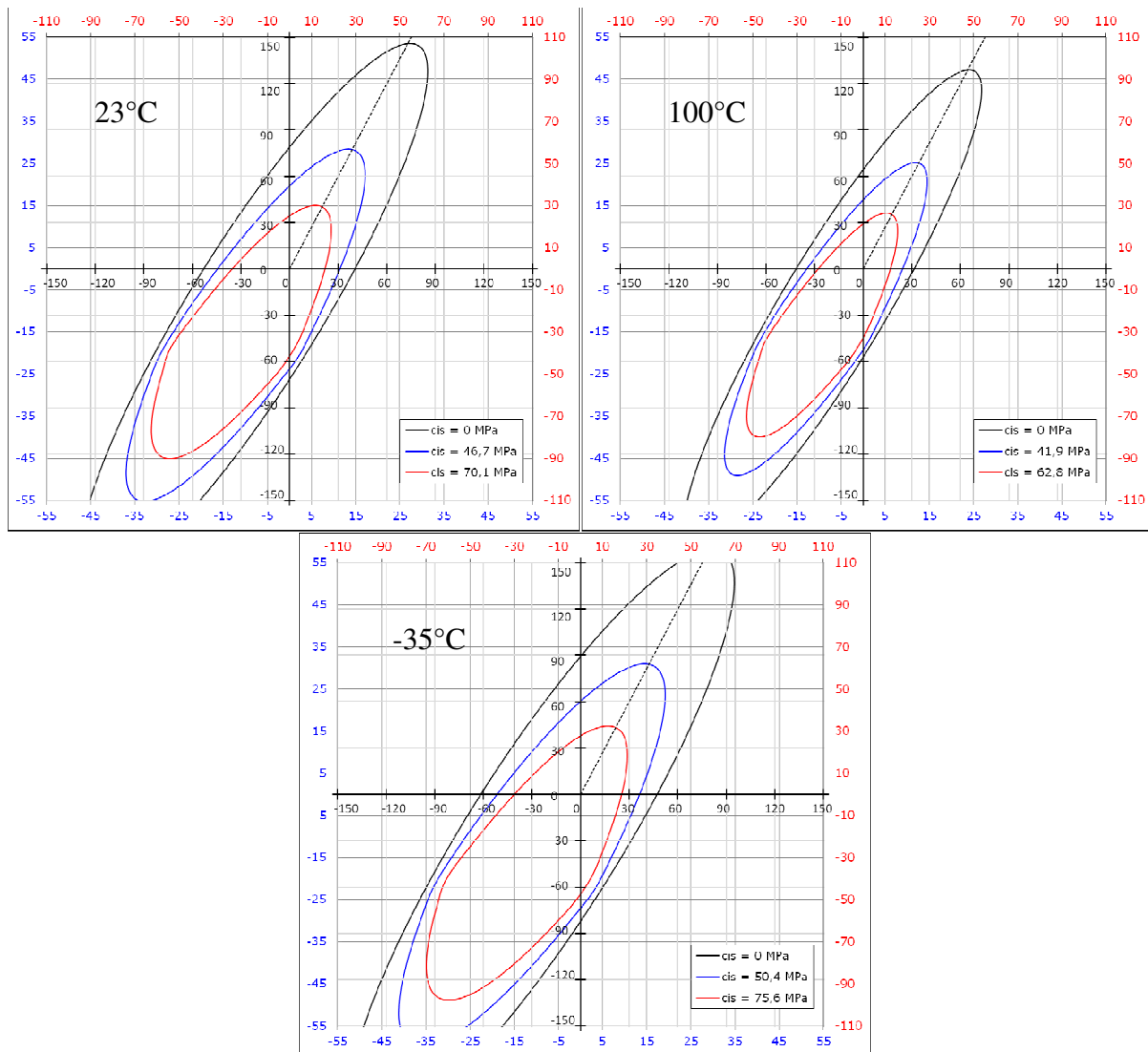
contraintes transverses à la paroi du tube

L'analyse dans le plan de la paroi du tube est réalisée en utilisant les enveloppes de premières ruptures du composite établies à partir du critère de Tsai-Wu. Dans ce cas nous nous intéressons aux contraintes de membrane σ_1 , σ_2 et τ_{12} se développant dans la paroi du tube sous l'effet du chargement appliqué. L'admissibilité des contraintes revient à vérifier que les points de fonctionnement en contraintes longitudinales et contraintes circonférentielles sont situés à l'intérieur de l'enveloppe de perlage pour un niveau de torsion donné.



éclatement d'un tube sous un état de contraintes planes

Les enveloppes de perlage sont illustrées sur la figure suivante pour trois températures pour un tube enroulé à $\pm 55^\circ$ avec un taux massique de fibre de verre de 70%

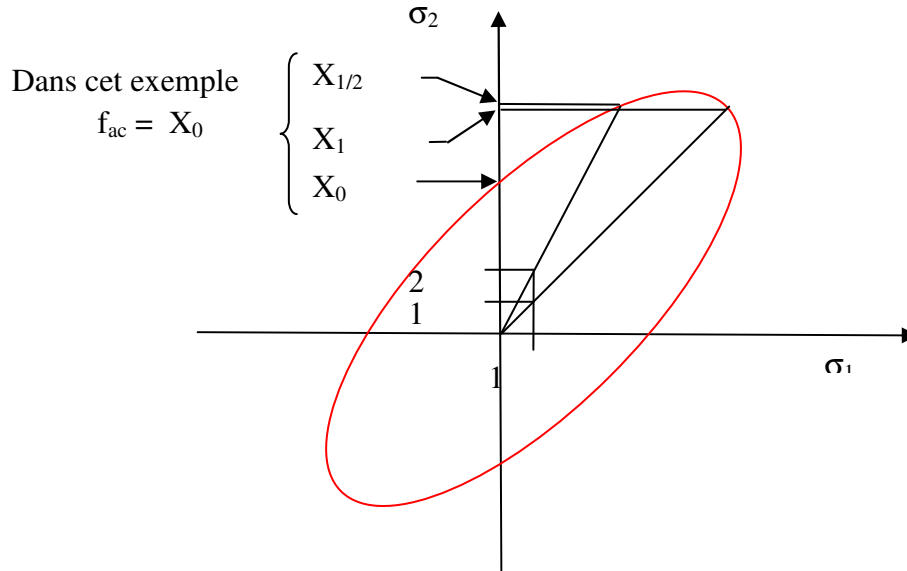


La résistance circonférentielle utilisée pour le dimensionnement à la pression est égale à la contrainte circonférentielle σ_2 minimale pour les trois cas suivants :

- Chemin de chargement pression/effet de fond : $\sigma_2 = 2 \sigma_1$, (ou $\sigma_c = 2 \sigma_1$)
- Chemin de chargement pression/effet de fond + flexion acceptable (zone en traction) : $\sigma_2 = \sigma_1$, (ou $\sigma_c = \sigma_1$)

- Chemin de chargement pression/effet de fond - flexion acceptable (zone en compression) : $\sigma_1 = 0$ (ou $\sigma_1 = 0$).

Cette méthode permet de garder une réserve en contrainte longitudinale pour une éventuelle mise en flexion globale de la ligne, exemple supportage de la partie aérienne..



Exemple de détermination des résistances $X_{1/2}$, X_0 et X_1 .

DÉMARCHE DE DIMENSIONNEMENT

➤ Analyse matériau

Les données matériaux nécessaires à l'analyse de la tuyauterie sont déterminées en fonction du type de matériau choisi devant répondre aux contraintes de tenue mécanique, de température, de compatibilité chimique...

L'enveloppe de perlage s'en déduit en fonction de l'angle d'enroulement, de la fraction massique de fibre et de la température.

La température oriente le choix de la résine. La limite d'utilisation des résines est donnée par leur température de transition vitreuse, température au delà de laquelle les propriétés élastiques chutent. En situation normale, la température de service doit être inférieure de 20°C à cette température de transition vitreuse. La reprise d'humidité fait chuter de 20 à 30°C la température de transition vitreuse, par conséquent, en situation de reprise totale d'humidité la température de service doit être inférieure de 40°C à la température de transition vitreuse de la résine.

Le fluide véhiculé oriente aussi le choix de la résine et l'éventuelle couche de protection chimique à ajouter.

➤ dimensionnement analytique

Il s'agit de pré-dimensionner les épaisseurs de tuyauteries et les assemblages par rapport au niveau de pression et à la température du fluide. Ces calculs permettent de justifier le choix des tubes et des accessoires en fonction des conditions d'utilisation et donne une réserve par défaut pour la flexion.

- Détermination du coefficient de sécurité
- Dimensionnement à la pression intérieure:
 - Détermination de l'épaisseur minimale du tube droit en fonction du niveau de pression et de la température. L'épaisseur de paroi minimale ne doit pas être inférieure à l'épaisseur calculée à partir de l'une des formules suivantes :

$$e = \frac{PD_i}{2f_{ac} - P} \qquad e = \frac{PD_m}{2f_{ac}}$$

- Vérification de la tenue aux surpressions (coups de bélier)
- Détermination de l'épaisseur minimale accessoires en fonction du niveau de pression et de la température. (Coudes, réductions, tés,...)
- Dimensionnement des assemblages en fonction du niveau de pression et de la température : longueurs de collage
- Dimensionnement à la pression extérieure (Flambage)
 - dimensionnement au poids des terres (Marston-Splangler)
 - vérification de la pression critique de flambement de paroi
- Supportage : choix du pas de supportage pour limiter la flexion de la tuyauterie.

➤ Analyse du réseau

Le dimensionnement en pression avec effet de fond est un chemin particulier de chargement pour les tubes à enroulement à 55°, tout écart par rapport à ce chemin par des effets de flexion, des blocages axiaux, fait chuter les propriétés limites apparentes du tuyau. Pour appréhender ces phénomènes, le réseau est analysé avec des outils numériques (éléments finis par exemple). Ce type d'analyse permet de prendre en compte la géométrie du réseau, les efforts de pression générés par les changements de directions, les dilatations thermiques, les dilatations hygrométriques, le poids et la rigidité des terres, le séisme,...

Les efforts et moments sont calculés en chaque point du réseau. Ils permettent de déterminer le niveau de contrainte local dans la tuyauterie ainsi que les efforts de réaction dans les supports.

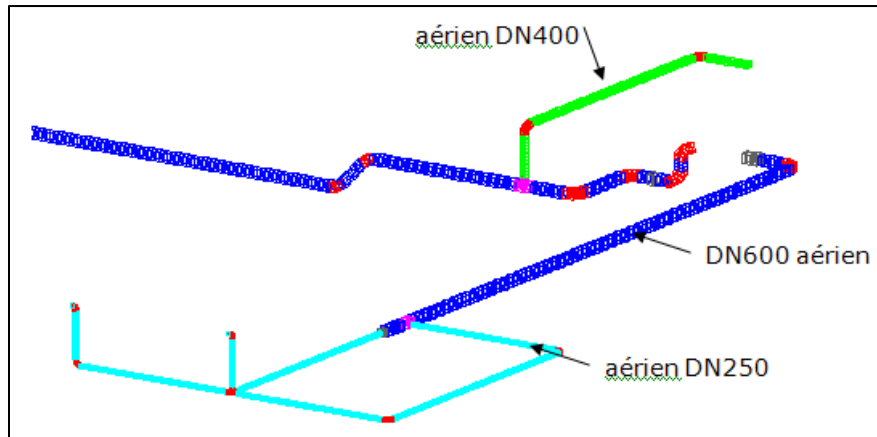
Les propriétés mécaniques des matériaux étant connues, le calcul du réseau est abordable avec des modèles de type poutres. Les analyses de portions en coque ou en 3 D sont inévitables au niveau des coudes ou tés en particulier lors d'avaries ou pour éviter des surdimensionnements.

Dans le cas d'un réseau de tuyauteries considéré comme un ensemble de poutres reliées entre elles, il est possible d'utiliser les programmes de calcul classiques qui, en général ne prévoient pas le cas de poutres orthotropes ou poutres ayant une rigidité en torsion indépendante de la rigidité axiale. Les données d'entrée sont limitées aux module d'Young et coefficient de Poisson, des équivalences pour obtenir un comportement adéquat sont possibles.

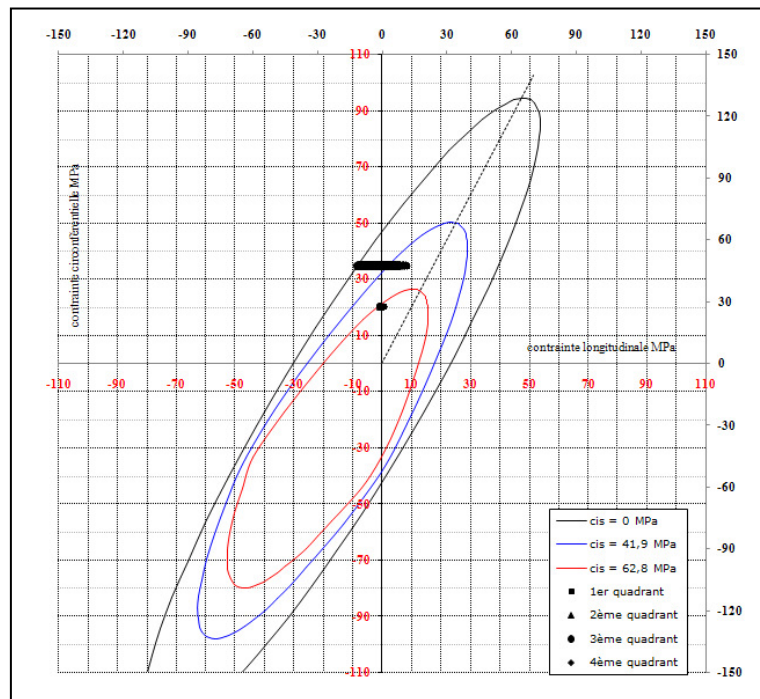
Dans le cas des tubes composites on va tout d'abord entrer :

- le module longitudinal réel E_1 .

- le diamètre extérieur et l'épaisseur qui permettent de calculer les propriétés de la section du tube.
- Dans certains codes le module de cisaillement est calculé à partir du coefficient de poisson. Il convient donc d'utiliser un « faux » coefficient de Poisson permettant de retrouver le module de cisaillement réel du tube composite. $\nu = \frac{G_{12}}{2E_1} - 1$
- le facteur de cisaillement = 1/2



Exemple de réseau composite - modèle poutres



Position des contraintes dans l'enveloppe de perlage

CONTROLE

Les méthodes de contrôles non destructifs adaptées aux tuyauteries composites sont :

- contrôles visuels : ils sont destinés à rechercher les défauts de surface (défauts de fabrication, traces d'impacts, dégradations dues au vieillissement,...) et constituent une exigence minimale de contrôle.
- contrôles par mesure de dureté Barcol : destinés à détecter les états de sous-polymérisation des tubes, accessoires en matériaux composites.
- contrôle par mesure DSC: pour détecter des états de sous-polymérisation pour les accessoires stratifiés en matériaux composites, les assemblages collés ou assemblages frettés et de vérifier la conformité de la tuyauterie à son domaine d'utilisation en température.
- contrôle par radiographie : pour détecter les manques de colle en contrôle radiographique par rayons X (limité à 120kV), sur des collages de tuyauteries composites, dans la mesure où la colle a été préparée en vue de ce contrôle,.
- contrôle par ultrasons : Les principaux défauts détectables par méthode ultrasonore sont les surfaces non collées, les délaminages, les vides et les variations d'épaisseur.

CONCLUSION

La rédaction de codes de construction par le SNCT est une de ses principales missions. Elle consiste à examiner l'état de l'art de la profession pour définir le type d'ouvrage à réaliser. Dans le cadre des études réalisées pour la Commission Chaudronnerie et Tuyauterie Industrielle, le Cetim en collaboration avec les industriels et le SNCT réalise des études pour répondre aux besoins de la profession et de faire évoluer les codes de constructions.

Dans le domaine de la tuyauterie, se retrouvent :

- Le "CODETI® Division 1 - Code de construction des tuyauteries industrielles (version française)
- Le "CODETI® Division 2 - Code de construction des canalisations de transport (version française)

A ces deux divisions, le SNCT compte ajouter une division 4 applicable aux matériaux composites.

Un soutien technique permanent existe. Le syndicat participe activement aux instances techniques de la Profession. Le SNCT et le Cetim participent aux instances élaborant les réglementations et aux groupes de travail développant les normes européennes et internationales. Les experts du SNCT et du Cetim dispensent des formations aux codes de construction.