

"Design by analysis"

DBA des appareils à pression composites

Samuel DURAND - Hubert MALLARD

Résumé:

La conception par l'analyse, «Design by Analysis» ou DBA, a été en particulier mise en avant lors du «lancement» de la Directive des Appareils à pression aux environs de 1995. Au lieu d'appliquer des règles de calcul, des graphiques, il s'agit ici d'utiliser les techniques d'analyse mécanique les plus avancées comme les éléments finis afin d'avoir accès au comportement des structures lors de la phase de conception ou bien lors de défaillances éventuelles en service.

Par la force des choses établies, la formation et l'expérience, les solutions métalliques utilisent cette méthode sans problème. Les analyses de comportement ou les analyses limites passent alors par des voies relativement sophistiquées, analyses élasto-plastiques...

Les démarches et les mises en pratique du « design by analysis » pour les appareils à pression composites ne se retrouvent pas encore systématiquement utilisées dans les applications courantes. La complexité inhérente ne provient seulement que du nombre d'informations à manipuler et pas réellement de la mécanique de base qui reste évidemment la même, toutes choses égales, que celle relative à l'acier.

L'exposé s'attache à montrer que la démarche pour les matériaux composites est plus complète que celle relative aux matériaux métalliques, que la mécanique y est seulement plus générale sans autres sophistications.

En conclusion, la prise en compte des composites fait évoluer vers une démarche orientée multi-matériaux. L'exposé est illustré d'exemples industriels :

- cuve composite sous pression : analogie avec le dimensionnement métallique,
- analyse d'une ligne de tuyauteries, accessoires et brides
- liaisons en chaudronnerie thermoplastique : collage et soudage.

1 - Introduction

Dans le domaine de la chaudronnerie, on notera en France l'évolution "décennale" de la normalisation depuis le "Code construction des matériels industriels en plastiques" édité par le CEMP de juin 1968, le Code de Construction des appareils chaudronnés en Plastique Armé de Syndicat Général de l'Industrie du Plastique Armé de décembre 1976, la norme NF T 57-900 de décembre 1987 et en 2004, la normalisation en cours Pr EN 13121-Part 1, 2, 3, 4 dont seules les parties 1 et 2 (J.O n° 102 du 30 avril 2004 page 7817) sont homologuées. L'ASME section X, Boiler and Pressure Vessel Committee est une référence pour la conception, la fabrication, l'inspection de ces structures soumises à pression... Ces codes n'excluent pas évidemment l'utilisation de logiciels mais laisse la responsabilité totale de leur emploi. Le "design by analysis" n'y est donc pas une composante essentielle sur un plan applicatif.

Dans le domaine de la tuyauterie, la conception de réseaux de tuyauteries en matériaux composites 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. Le domaine de fonctionnement imposé allait de -30°C à 120°C, de 8 à 15 bars, des diamètres de 50 à 700 mm. Cela correspondait 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 qui ne prend pas en compte l'anisotropie ni la prise en compte des coudes, piquages, tés. Le problème des chocs, de l'amortissement pour les calculs sismiques se sont ensuite ajoutés. L'installation de réseaux de tuyauteries à une grande échelle, en particulier l'installation pour EDF de circuits classés de sûreté nucléaire sur le site de la centrale de Civaux, ou

bien les installations sur le site de l'île de Chatou, la centrale de Jarry Nord en Guadeloupe, a déclenché des demandes d'étude adaptées, nous citerons celle du Groupe de Travail 4 de la Commission Chaudronnerie du CETIM sous la maîtrise d'oeuvre du SNCT et, en particulier, avec les Sociétés Nordon, Endel (Entrepose), SBPI et EDF. En complément, le marché de l'assainissement urbain est aussi un enjeu sachant que les tubes de grand diamètre, >600 mm, sont très concurrentiels par rapport aux tubes en fonte. Un contrat européen en cours traite le dimensionnement et la caractérisation des tuyauteries et accessoires (<http://www.comtec-ac.com/G6RD-CT2000-00259-en.htm>) : Design of GRP Flanges and Tests to Verify the Design and to Determine Long-Term Properties of GRP Pipes, Contract: G6RD-CT2000-00259, 5th Framework specific R & D Programme "Competitive and Sustainable Growth" 12 parties contractantes provenant de 7 pays européens... Ces études avancent dans le domaine du "design by analysis", les réflexions y sont difficiles, la quantité d'informations à manipuler est grande sans difficultés ponctuelles importantes.

Dans le domaine des liaisons par collage ou par "soudage" dans le cas des thermoplastiques, il n'existe pas vraiment de codes spécifiques adaptés aux composites (ISO/DIS 7432, 1985). Des règles de l'art sont mentionnées dans les codes. Des solutions conservatrices sont appliquées sans faire référence à une analyse mécanique classée et répertoriée. On ne retrouve pas de notion de "design by analysis".

En conséquences, les appareils à pression sont laissés à l'application de règles, de solutions conservatrices éprouvées, cela conduit à des sur-dimensionnements, des défaillances non explicables. Un verrou technique important existant actuellement pour les pièces chaudronnées en composite est le sur-dimensionnement. On trouve des marges de sécurité imposées jusqu'à 6 en statique, voire 9 en durabilité. Ces valeurs empêchent toute recherche d'optimisation et toute comparaison avec d'autres matériaux. De plus, ces coefficients ne

sont pas sûrs car un grand coefficient de sécurité multiplié par une valeur approximativement calculée ne donne pas finalement de sécurité.

"Ut tensio sic vis"... Plus que pour l'acier, l'analyse mécanique des structures en composites, demandant la manipulation d'un grand nombre de variables, demande 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 au sein d'une "multi-approche": multi-matériaux, multi-physique, multi-échelles.

"Dans les dernières années, la Mécanique des Matériaux s'est développée sur la base de l'interaction entre la mécanique et d'autres disciplines comme la métallurgie, la physique, la chimie. Les avancées de la modélisation du comportement mécanique des polymères, la meilleure compréhension des phénomènes de transformation de phase dans les aciers ou encore du comportement mécanique des matériaux granulaires sont à mettre au crédit de cette collaboration interdisciplinaire. La prise en considération de cette complexité du comportement devient possible grâce à l'utilisation de moyens d'investigation expérimentale de plus en plus performants, capables de mesurer des grandeurs non strictement mécaniques et d'obtenir des champs de variables et non plus des valeurs globales. La modélisation de ces nouveaux phénomènes nécessite également une adaptation de la démarche classique en élargissant le lot de variables utilisées. De plus, les échelles caractéristiques de ces phénomènes ne correspondent pas en général à l'échelle mécanique du calcul de structures. Des outils de changement d'échelle doivent donc être développés pour relier plusieurs échelles de description. Enfin, la complexité des lois de comportement attendues nécessite l'utilisation d'approches numériques, voire informatiques, novatrices." réf. 1



1. Licht Christian, Mécanique & Industries 3 (2002),423

2 - Listes de codes de constructions

En 1998 réf. 2, le marché mondial des composites s'est accru de 1.8%, le marché européen de 5%. Il se trouve à 5.5 MT dont 75% de thermodurcissables dans le monde et de 1.6 MT en Europe. En 1999, le marché européen des composites à base



2. Estimations de Vetrotex, revue Plastiques Modernes et élastomères-Avril 1999

de fibres de verre a progressé de 5.9% réf. 3 et se trouve à 946 000 tonnes. La pultrusion a stagné, l'enroulement filamentaire a cru de 1.7%, les tubes



3. German Reinforced Plastics Association ou Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe Technische Vereinigung e.V. ou AVK-TV, cité dans KU Kunststoffe Jahrg.90 (2000) pages 40-41

réalisés par centrifugation ont progressé de 20%
 par les demandes des collectivités locales, 8.2%
 pour les procédés manuels.

Tableau 2.0.0.a - Codes et ouvrages chaudronnerie-composites

	La norme la plus avancée: BS 7159, British Standard, Code of Practice for Design and Construction of Glass Reinforced Plastics (GRP) Piping Systems for Individual Plants or sites
	BS 4994: Specification for vessels and tanks in reinforced plastics, BSI, 1987
	BS 7169 Code of practice for design and construction of glass reinforced piping systems
	BS 6464: reinforced plastic pipes, fittings and joints for process plants, BSI, 1984.
	BS 5480 - 90 :Glass reinforced plastics (GRP) pipes, joints and fittings for use for water supply or sewerage
	BS 8010 B.S. Code of practice for Pipelines - Section 2.5 Glass reinforced thermosetting plastics
	UKOOA, specifications and recommended practices for the use of GRP piping offshore : part 1 à 5
	British Standard BS 806 (1993)
	ASME Boiler and Pressure and Pressure Vessel Code, Section X, Fiberglass Reinforced Plastics Pressure Vessels, 2001 Edition, ASME, New York, N.Y.
	Code CASE 155-2
	ASME B31.3 Chapter VII: Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping
	ASME B31.1-2001 power piping
	ASME B31.3-1999, ASME B31.3a-2000 and ASME B31.3b-2001 process piping
	ASME B31.4-1998 and ASME B31.4a-2001 liquid transportation;
	ASME B31.8-1999 and ASME B31.8a-2000 gas transmission and distribution;
	ASME Section III Class 2 (2001);
	ASME Section III Class 3 (2001);
	ASME-ANSI-RTP-1989, Reinforced Thermoset Plastic corrosion Resistant Equipment, jusqu'à 0.1 MPa,
	ASME/ANSI B31.3 Chemical Plant and Petroleum Refinery Pipes, 1987
	ASME/ANSI RTP-1-1995, Reinforced Thermoset Plastic Corrosion Resistant Equipment
	ANSI/AWWA C950-95 Standard for Fiberglass Pressure Pipe, Octobre 1996
	AWWA Manual M45, Fiberglass Pipe Design, ISBN 0-89867-889-7, 1996
	MIL-P-79C, Plastics Rods and Tubes, Thermosetting laminated
	L-A-509a, Federal Specifications, Plastics Sheet, Rod, and Tube, laminated thermosetting

Tableau 2.0.0.a - Codes et ouvrages chaudronnerie-composites

	<p>ASTM, volume 08-04 Plastics Pipes and Building products, 1998, committee D-20 Plastics, F-17 Plastics Piping Systems</p> <p>ASTM D3262 Standard Specification for "Fiberglass" (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Sewer Pipe</p> <p>ASTM D-3567-97: standard practice for determining Dimensions of "fiberglass" Pipe and Fitting</p> <p>ASTM D3517 Standard Specification for "Fiberglass" (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pressure Pipe</p> <p>ASTM D 3754 Standard specification for "Fiberglass" sewer and industrial pressure pipe</p> <p>ASTM D1598 Standard Test Method for Time-to-Failure of Plastic Pipe Under Constant Internal Pressure</p> <p>ASTM D1599 Standard Test Method for Short Term Hydraulic Failure Pressure of Plastic Pipe, Tubing and Fittings</p> <p>ASTM D2412 Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastics Pipe by Parallel-Plate Loading</p> <p>ASTM D2924 Standard Test Method for External Pressure Resistance of Reinforced Thermosetting-Resin Pipe</p> <p>ASTM D3681 Standard Test Method for Chemical Resistance of "Fiberglass" (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe in a Deflected Condition</p>
	<p>ASTM D2310 Standard Classification for Machine-Made Reinforced Thermosetting-Resin Pipe</p> <p>ASTM D2996 Standard Specification for Filament-Wound "Fiberglass" (Glass-Fiber Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe</p> <p>ASTM D4161 Standard Specification for "Fiberglass" (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe Joints Using Flexible Elastomeric Seals</p> <p>ASTM C581 Standard Practice for Determining Chemical Resistance of Thermosetting Resins Used in Glass-Fiber-Reinforced Structures Intended for Liquid Service</p> <p>ASTM D2488 Standard Practice for Description and Identification of Soils</p> <p>ASTM D2563 Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts</p> <p>ASTM D2992 Standard Practice for Obtaining Hydrostatic or Pressure Design Basis for "Fiberglass" (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe and Fittings Procedure B - Steady pressure</p> <p>ASTM D3839 Standard Practice for Underground Installation of "Fiberglass" (Glass-Fiber- Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe</p>
	<p>Deutscher Verlag fuer Schweisstechnik, DVS, Schweißen und Kleben von Kunststoffen, R2201 to R2225, 1989, DVS-Verlog GmbH, Düsseldorf, Germany</p> <p>n°2205: calcul des cuves et appareils en thermoplastique, partie 1, Additif 1, partie 1, Additif 2, partie 1, Additif 3, partie 1, Additif 4, fluage PP et PVDF; calcul des cuves et appareils en thermoplastique, cuves verticales partie 2, partie 4 ...</p> <p>AD-Merkblatt N1 à N4: Pressure vessels in glass fibre reinforced thermosetting plastics</p> <p>Germanischer Lloyds, II - Part 2 Section 2</p>

Tableau 2.0.0.a - Codes et ouvrages chaudronnerie-composites

	NF T 57-900, SGIPA, code CEMP: réservoirs et appareils en matières plastiques renforcées-Code de construction
	NF T 57-200 tubes et raccords en matériaux composites verre thermodurcissable, fascicule général.
	NF T 57-207, Obtention de données de base pour le calcul des dimensions de tubes et raccords sous pression interne constante
	NF T 57-208 Tubes en plastique renforcé de fibres-Conception calcul des dimensions des assemblages par emboîtement collé-Caractéristiques
	NF T 57-209 Canalisation en plastique renforcé de fibres-Installation enterrée de canalisations à comportement flexible utilisées avec ou sans pression-Mise en œuvre
	Pr NF EN 1450/A1 Systèmes de canalisation en plastiques - Composants en plastiques thermodurcissables renforcé de verre (PRV) - Méthodes d'essai pour confirmer la conception d'assemblages à brides boulonnées (T 57-226/A1)
	UNI 9032 Tubi di resine termoindurenti rinforzate con fibre di vetro (PRFV) con o senza cariche. Tipi, dimensioni e requisiti. UNI 9033 Tubi di resine termoindurenti rinforzate con fibre di vetro (PRFV) con o senza cariche. Metodi di prova.
	B137.9-M91-CAN/CSA : Tuyaux et Raccords sous pression en matériaux composites, polyéthylène, aluminium
	Cahier des charges Rhône-Poulenc pour la conception, l'achat et la construction d'équipements en matière plastiques armées
	ICI Specifications for the fabrication of Glass reinforced Plastic pipes systems, 1976
	SFS 5161-SFS 5176 Plastics Pipes, Finnish Standards Association
	AWWA M-45 design manual
	ISO 7370, glass fibre reinforced thermosetting plastics (GRP) Pipes and Fittings. Nominal diameters, specified diameters and standard lengths. ISO 14692-1:2002 Petroleum and natural gas industries -- Glass-reinforced plastics (GRP) piping -- Part 1: Vocabulary, symbols, applications and materials ISO 14692-2:2002 Petroleum and natural gas industries -- Glass-reinforced plastics (GRP) piping -- Part 2: Qualification and manufacture ISO 14692-3:2002 Petroleum and natural gas industries -- Glass-reinforced plastics (GRP) piping -- Part 3: System design ISO 14692-4:2002 Petroleum and natural gas industries -- Glass-reinforced plastics (GRP) piping -- Part 4: Fabrication, installation and operation
	OLF: OLF Recommended Guidelines on the specification for composite Piping Offshore, 1991
	Norsok Standard M-CR-621, décembre 1994
	Norsk Standard NS 6125 1986, NS 6125-6-7-8 1986
	KRV A 984/82-02 Instructions for design and installation of piping made of glassfibre reinforced thermosetting resins, with and without liner
	IMO DE 33/6/2 Guidelines For the Application of plastics Pipes on ships
	API SPEC 15HR, specification for High Pressure Fiberglass Line Pipe
	API SPEC 15LR, specification for Low Pressure Fiberglass Line Pipe
	Future pipe, Wavin, Tuyauteries en Epoxy, Wavistrong guide technique, 1/10/94

Tableau 2.0.0.a - Codes et ouvrages chaudronnerie-composites

	VED, GRP piping systems technical guide, www.ved.it, piping@ved.it
	SNIP 2.05-06-85 Russian Transmission Piping Code
	Regeln der Technik für mittelgrosse zylindrische Tanks mit flachen Boden aus glasfaservrstärktem Kunststoff, Mars 1993, Association suisse des matières plastiques
CEN	Work item ID, CEN/TC 267, 00267023 Industrial piping and pipelines - Fibre reinforced plastic and plastic piping - Buried piping - Part 3: Safety devices
	<p>Pr EN 13121- Part 1, 2, 3, 4 - Réservoirs et appareils en PRV pour utilisation hors sol GRP Tanks and Vessels for use above ground</p> <p>1 - GRP tanks and vessels for use above ground - Part 1: Raw materials - Acceptance conditions and usage conditions</p> <p>2 - GRP tanks and vessels for use above ground - Part 2: Composite materials - Chemical resistance</p> <p>3 - GRP tanks and vessels for use above ground - Part 3: Design and workmanship</p> <p>4 - GRP tanks and vessels for use above ground - Part 4: Delivery, installation and maintenance</p> <p>cf http://www.cenorm.be/newapproach/cen/stdlist.asp?dir_area=97/23/EC&prod_fam=CEN/TC%20210</p>
	prEN 13923 Récipients sous pression en plastique renforcé de fibres de verre enroulées - Matériaux, conception, calcul, fabrication, et essais, septembre 2000
	prEN 1115 Plastics Piping systems for underground drainage and sewerage under pressure - GRP, polyester
	prEN 1636 Plastics piping systems for non-pressure drainage and sewerage - GRP, polyester
	prEN 1796 Plastics piping systems for water supply with and without pressure - GRP, polyester
	EN 764 - Equipement sous pression - Terminologie - Symboles - Pression, température, volume
	EN 1120, NF T 57 216, Plastics piping systems, GRP, Resistance to Chemical Attack
	EN 1125, NF T 57 217, Plastics piping systems, GRP, Creep
	EN 1227, NF T 57 219, Plastics piping systems, GRP, Ring Deflection
	EN 1447, NF T 57 204, Plastics piping systems, GRP, Long terme resistance to internal pressure
	EN 705, Plastics piping systems, GRP, Regression analyses

3 - "design by analysis" et composite

Pour l'acier, de façon courante, et certes de façon un peu simplifiée, le "design by analysis" au niveau de la conception ou bien lors d'analyse de défaillances s'effectue à partir des éléments suivants:

- 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 fiches de normalisées pré-existantes,

- des conditions aux limites,
- des chargements.

Pour le composite, "le design by analysis" doit prendre en compte les éléments suivants:

- la géométrie est la base pour la dépose des couches, cette géométrie se complexifie donc immédiatement par la séquence d'empilement associée, 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... retenons 20. 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 5 environ. Il faut y rajouter des problèmes spécifiques comme les propriétés transverses faibles, les dilatations dues à l'humidité. Les matériaux constitutifs du matériau hétérogènes sont de l'ordre de quelques unités, par exemple 5. Dans la Directive Européenne, il n'y est pas inclus de fiches matériau, aussi la caractérisation est 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. Les pièces étant plus épaisses, voire sandwich, les

conditions aux limites sont aussi un problème dans le cas des modèles coques pour lesquels les compatibilités de décalage du plan de référence des propriétés et application des conditions aux limites ne sont pas posées,

- dans le cas du composite, même pour un comportement élastique linéaire, les chargements se combinent en comportement, l'analyse en résistance est indépendante. Un comportement isotrope peut être lié à une résistance limite anisotrope. Les raisonnements d'analyse obligent 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, la communication des résultats sous forme graphique est lourde, les logiciels ne s'étant pas encore appropriés ces types d'analyse...

Ce paragraphe ne fait que rappeler les complexités des composites. Le niveau technique d'analyse mécanique est du même degré que pour celui de l'acier, mais la quantité d'informations est grande et elle demande des efforts particuliers pour s'y coller. On s'aperçoit que cette complexité peut être rapportée à un chiffre: 20x5x3, soit environ 300 fois plus d'effort de caractérisation! Cela explique le manque de fiches matériau malgré tous les efforts tentés dans ce sens dans les années 80. Malgré cela, le "design by analysis" est abordable pour les composites, il est réalisable et réalisé dans la mesure où on accepte des règles techniques, des raisonnements sans concessions et dans la mesure où l'on dispose d'outils et de ressources adaptées. Le paragraphe suivant va lister cette démarche.

4 - Démarche composite

Pour les composites, il faut tout d'abord accepter de s'impliquer au niveau des constituants, au niveau des fibres et de la résine.

4.1 - Constituants

Les fibres et la résine sont les constituants élémentaires dont il faut connaître les propriétés. Par défaut, on va utiliser les propriétés suivantes pour la résine, il suffira de valider que la résine choisie est bien dans cette gamme-là:

Tableau 4.1.0.a - valeurs par défaut des résines à T ambiante

	Dénomination	Valeur par défaut
ρ_m	masse volumique	1 200 kg/m ³
E_m	module d'Young	3 200 MPa
Ψ_m	amortissement	8%
X	limite traction MPa	$E/43 = 74$ MPa (40-55)
X'	limite compression MPa	$X \cdot 1.7 = 126$ MPa
S	limite cisaillement MPa	$X/1.7 = 43$
ε_T	déformation limite en traction	$X/E = 2.3\%$
α_m	dilatation thermique m/m/K	$(15/(E_m \cdot 10^6))^{0.5} = 68 \cdot 10^{-6}$
δ_m	retrait%	0.02
β_m	dilatation hygrométrique en m/m/(Kg eau absorbée/Kg matière)	$1/3(\rho_m/\rho_{\text{eau}} - 0.004) \cdot 0.98 = 0.39$
H_m	absorption d'eau	3%
λ_m	conductivité thermique	0.2 W/(m °C)
Cp_m	capacité calorifique massique	1 050 J/kg/K

La fibre de verre a des propriétés intrinsèques qu'il faut déduire du comportement de couches avec les modèles physiques cohérents associés:

Tableau 4.1.0.b - propriétés fibres de verre E

Dénomination	Verre E
ρ_f kg/m ³	2 540
E_f MPa	73 000
v_f	0.22
α_f $\mu\text{m}/(\text{m K})$	5.3
λ_f W/(m K)	1.09
Cp_f (J/ Kg)	840
Ψ_f	1.1%

Tableau 4.1.0.b - propriétés fibres de verre E

Dénomination	Verre E
Ψ_{xyf}	0.6%
X_f MPa	1 990
X'_f ou X_{pf} MPa	1 200
S_f MPa	1 200

Ces tableaux peuvent être admis, mis en normalisation, dans les codes. Ce sont des valeurs au même niveau que les propriétés de l'acier. On conçoit 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 des composites est celui des constituants, pas de la couche et que tout le reste sera ensuite calculable. Les limites de calculs d'homogénéisation sont connues, il n'y a pas de modèle faux ou juste, les modèles existent en parallèle de la réalité et y collent au mieux en fonction de leur évolution ou sophistication.

4.2 - Couches

Il est courant d'utiliser des modèles "parallèles" comme borne haute de la loi des mélanges et des modèles "série" comme borne basse. Dans le sens axial des fibres x, le modèle parallèle fonctionne bien, dans le sens transverse y le modèle série sous-estime les propriétés, aussi recourt-on à une loi mixte "série-parallèle" dite loi de Halpin-Tsai dans la direction transverse y. Nous pouvons poser une expression plus générale :

- loi parallèle:

$$\begin{array}{c} \uparrow \\ \square \\ \downarrow \end{array} E_x = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (1)$$

- loi série:

$$\begin{array}{c} \uparrow \\ \square \\ \downarrow \end{array} \frac{1}{E_x} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{(1 - V_f)}{E_m} \quad (2)$$

- loi générale proposée:

$$\begin{array}{c} \uparrow \\ \square \\ \downarrow \end{array} E_x^\phi = E_f^\phi V_f + E_m^\phi (1 - V_f) \quad (3)$$

- $\phi = 1$, on retrouve la loi parallèle,
- $\phi = -1$, on retrouve la loi série,

- $\nu = -0.2$, on retrouve la loi série-parallèle de Halpin Tsai.

On fera ensuite un rapprochement entre cette dernière loi et les fractals. En tout état de l'art, on peut disposer d'une panoplie de modèles de prévision pour les propriétés élastiques, thermiques, hygrométriques. Les résistances sont difficiles à appréhender mais des valeurs basses sont possibles à générer de façon fiable pour tout type de couche: mat, tissu, unidirectionnel, alvéolées... renfort continu ou non.

La caractérisation par essais vient seulement valider les données de base ou les données les plus problématiques. Elle est liée aux modèles de prévi-

sion des couches. L'identification associée des paramètres demande la connaissance de ces modèles.

Par ces "simples" calculs, sur des structures très complexes, on a pu obtenir des corrélations calcul-essais conduisant à un écart de l'ordre de 10% sans recalage.

Une bonne utilisation des invariants conduit aussi à des formulations plus simples que celles utilisées actuellement. Voici par exemple une formule à proposer dans un code déduit de l'utilisation d'invariants, le coefficient de Poisson en fonction du taux en masse de fibres M et de l'angle d'enroulement d'un $\pm\theta$ en verre E:

(4)

$$\nu_{21} = \frac{-(7074M - 964) \cos(40) + 12000M - 1000}{(7074M - 964) \cos(40) - (24148M - 2413) \cos(20) + 36061M - 3452}$$

Il ne suffit pas d'avoir des valeurs, il s'agit aussi d'avoir un ensemble cohérent de données afin d'éviter les matrices singulières en calcul par éléments finis.

4.3 - Stratifié

Les théories des stratifiés minces ou épais, sont du même niveau de complexité et fiabilité que ceux relatifs aux calculs de structures acier en plaque, coque. Par exemple, propriétés calculées ,

Tableau 4.3.0.a - enroulement $\pm\theta$, fraction en masse de verre E: M=0.7

Angle θ du $\pm\theta$	45	50	55	60	65	70	75	80
Fraction en volume V%	52							
Fraction en masse M%	70							
Rigidités en contraintes planes								
Tôle d'acier doux	218 000							
E_1 MPa	10976	9908	9570	9684	10024	10440	10833	11144
E_2 MPa	10 976	13 055	16299	20 580	25 436	30 210	34 304	37 346
ν_{12}	0.63	0.53	0.44	0.34	0.26	0.20	0.15	0.11
ν_{21}	0.63	0.70	0.74	0.73	0.66	0.57	0.46	0.37
G_{12} MPa	11 418	11 175	10 476	9 405	8 091	6 693	5 380	4 309
E_1/G_{12}	0.96	0.88	0.91	1.03	1.24	1.56	2.01	2.59
Dilatation thermique en 10^{-6} m/(m °C)								
α_1	17	25	33	38	42	44	45	45
α_2	17	11	6.5	4.9	4.8	5.5	6.4	7.1
α_3	54	53	52	50	49	48	47	46
Dilatation hygrométrique en m/m par kg d'eau absorbé par kg de matériau								
β_1	0.18	0.08	0.48	0.55	0.60	0.63	0.64	0.65

Tableau 4.3.0.a - enroulement $\pm\theta$, fraction en masse de verre E: M=0.7

Angle θ du $\pm\theta$	45	50	55	60	65	70	75	80
β_2	0.28	0.19	0.13	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14
Coefficient du critère de Tsai-Wu, à appliquer à la couche à $+\theta$: - avec les contraintes existant dans cette couche, - ou bien avec les contraintes globales existant sur l'empilement à $+\theta$ et en rajoutant la contrainte de cisaillement générée dans les couches par les contraintes globales σ_1 et σ_2 . (Pour l'acier, Von Mises!)								
FB_{11} MPa ⁻² x 10 ⁶	371.1	384.7	383.7	370.0	346.9	318.9	290.7	266.7
FB_{22} MPa ⁻² x 10 ⁶	371.1	342.4	300.4	248.3	190.5	132.4	79.8	37.9
FB_{12} MPa ⁻² x 10 ⁶	-257.7	-250.2	-228.7	-195.7	-155.3	-112.3	-71.9	-38.9
FB_{66} MPa ⁻² x 10 ⁶	266.6	296.4	382.5	514.3	676.0	848.0	1009.7	1141.5
FB_{16} MPa ⁻² x 10 ⁶	-121.7	-35.1	44.8	109.1	150.7	165.7	153.7	117.6
FB_{26} MPa ⁻² x 10 ⁶	-121.7	-204.6	-273.6	-320.0	-337.2	-322.2	-275.4	-200.9
FB_1 MPa ⁻¹ x 10 ³	3.79	4.59	5.37	6.10	6.76	7.32	7.79	8.13
FB_2 MPa ⁻¹ x 10 ³	3.78	2.98	2.20	1.48	0.820	0.250	-0.212	-0.552
FB_6 MPa ⁻¹ x 10 ³	-9.2	-9.1	-8.7	-8.0	-7.1	-5.9	-4.6	-3.1

4.4 - Éléments de structures

L'analyse des structures se confond avec l'analyse locale matériau comme pour l'acier. Les formulations RDM sont applicables mais demandent une bonne maîtrise de leurs approximations, par exemple, une structure est dite épaisse pour l'acier si l'épaisseur est moins de 10 fois inférieure au rayon de courbure local ou la dimension principale de la pièce, pour les composites, ce rapport est plutôt de 20, voire de 50 pour un sandwich. La structure composite est épaisse aussi en valeur absolue dès que l'épaisseur atteint 30 mm à cause des réactivités des résines qui induisent des contraintes résiduelles importantes. L'épaisseur de quelques cm

induit des reprises d'humidité sur des années, donc à des développements de déformations parasites non visibles à la qualification initiale.

4.5 - Structures

La géométrie est définie, les propriétés matériau sont entièrement définies par calcul, le "design by analysis" se met en place sans problème plus difficile que pour l'acier. La dépose des couches sur la structure reste un problème en calcul de structure Peu de programmes s'aventurent dans ce domaine, ils laissent au soin à l'utilisateur à faire au mieux en ne leur offrant que la visualisation pour contrôle de ce qui est entré.

5 - Cuve composite sous pression

5.1 - démarche

Il s'agit d'analyser le comportement et de calculer les marges de sécurité par rapport à la rupture pour une cuve en composite à partir des données sur les matériaux calculées en fonction de la composition et des épaisseurs fournies. Ces marges de sécurité déterminées par les premières ruptures de couche ou l'estimation de la rupture finale du stratifié seront comparées aux marges admises par la

norme NF T 57-900 (code de construction des réservoirs et appareils en matières plastiques renforcées). Le critère de rupture utilisé pour calculer les marges est le critère de TSAI WU pour les premières ruptures de couches. Pour estimer la rupture finale, on suppose que les propriétés transverses des couches sont dégradées en rigidité et le nouveau report des couches dû à cette dégradation permet d'avoir cette valeur.

5.2 - matériaux utilisés et zones d'empilements

Tableau 5.2.0.a - caractéristiques des couches nécessaires pour le calcul

Couches	gram-mages	épais-seurs	taux de fibre masse
Mat	g/m ²	mm	%
Fils	g/m ²	mm	%
Tissu	g/m ²	mm	%
UD unidirectionnel	g/m ²	mm	%

On peut trouver 3 empilements matériaux différents dans cette cuve; un empilement Mat/Fils/UD, un empilement MatTissu et du Mat seul. Les caractéristiques de ces trois matériaux de base sont calculées à partir des propriétés des constituants résine thermodurcissable et fibre de verre E.

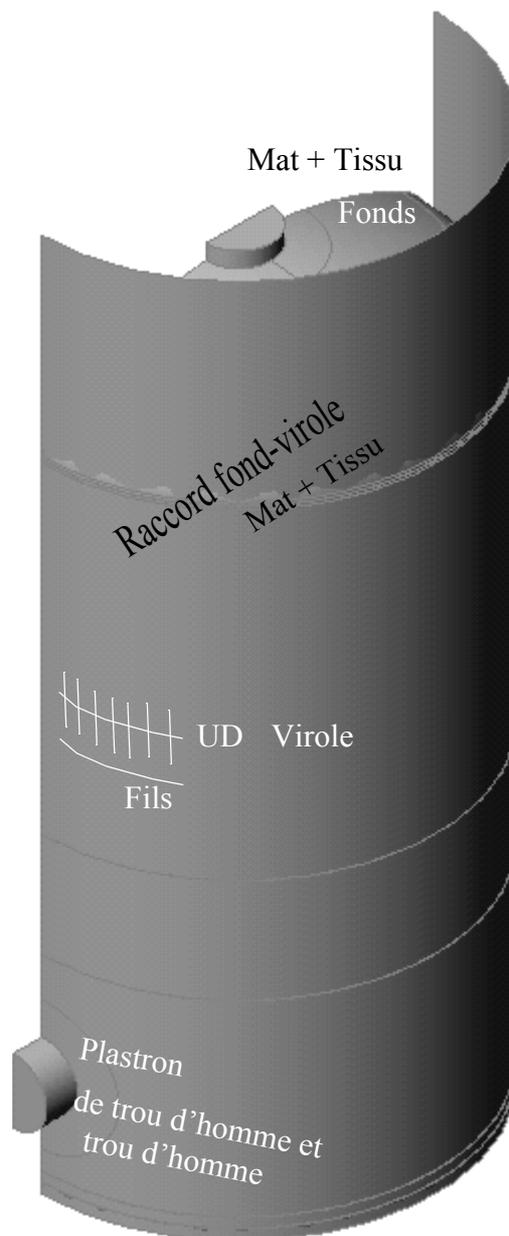
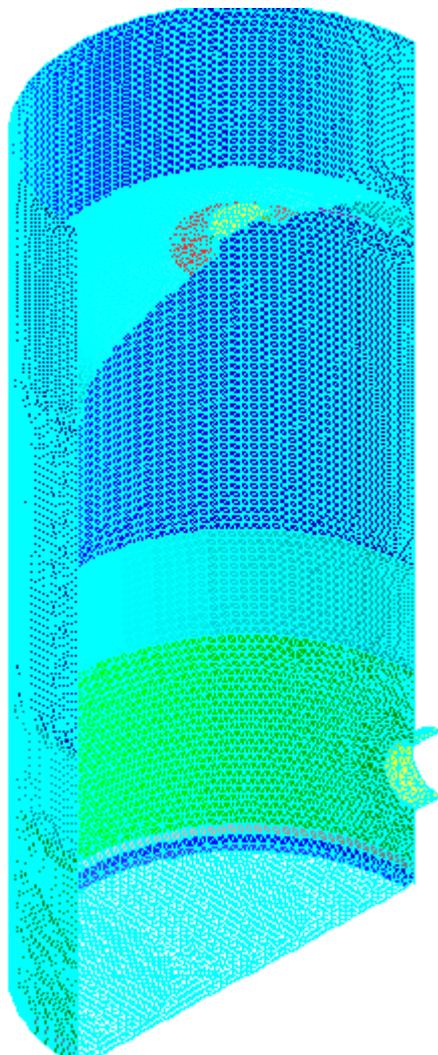


Tableau 5.2.0.b - caractéristiques mécaniques des matériaux équivalents

Caractéristiques	Mat/Fils/UD	MatTissu	Mat seul
Masse volumique (g/cm ³)	1.70	1.49	1.44
Ex (MPa)	11800	10741	8920
Ey (MPa)	25900	10741	8920
Ez (MPa)	8600	5500	4960
Nu xy	0.114	0.279	0.352
Nu xz	0.025	0.295	0.352
Nu yz	0.338	0.198	0.142
Gxy (MPa)	2686	2951	3298
Gxz (MPa)	2652	3085	3374
Gyz (MPa)	3263	3085	3374

5.3 - Modèle de calcul

Figure 5.3.0.a - Maillage

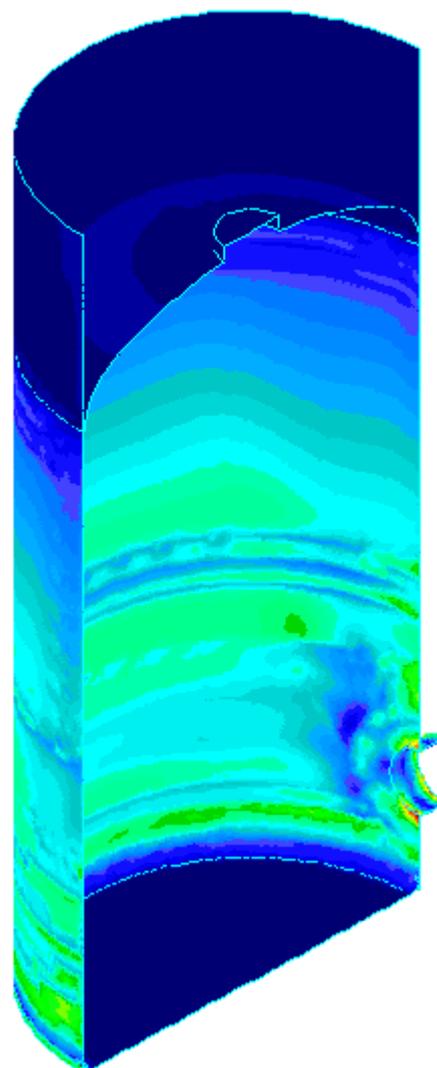


Seule la moitié de la cuve est modélisée car l'ensemble de la structure et de son chargement est symétrique. Le calculateur définit les différentes zones d'empilement. Il affecte pour toutes les zones, les propriétés mécaniques précédemment calculées.

Les conditions aux limites et les chargements ne sont pas liés aux matériaux utilisés et ne sont pas explicités dans cette présentation.

5.4 - Analyse des contraintes

Visualisation des contraintes de Von Mises, noter qu'on n'utilise pas ces données pour calculer les marges, il ne s'agit que d'une visualisation des zones les plus contraintes.



5.4.1 - Coefficient de sécurité suivant NF T 57-900

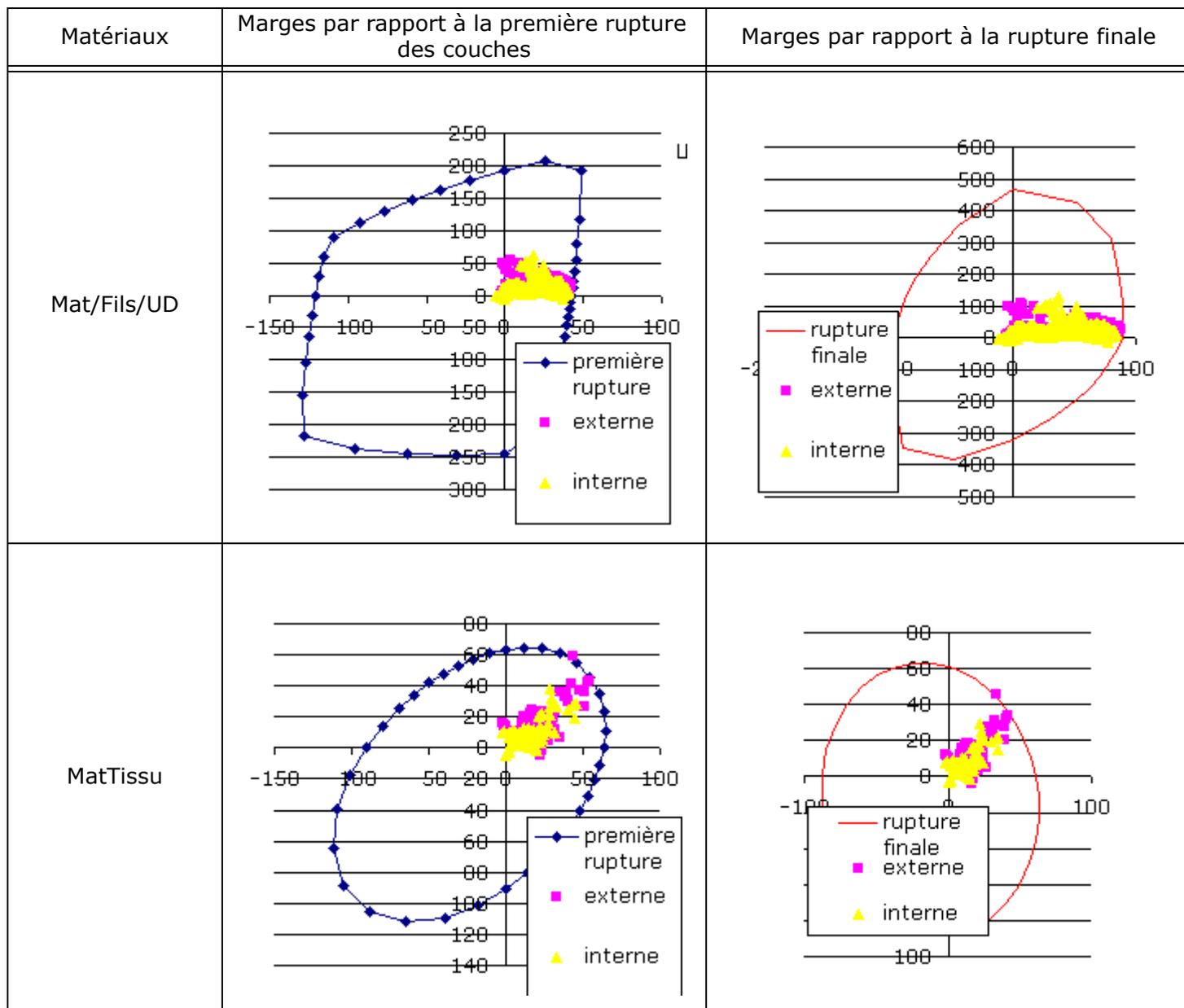
Cette norme de construction des réservoirs et appareils en matières plastiques renforcées précise (paragraphe 3.11 page 28) que le coefficient de sécurité par rapport à la rupture sera pris au minimum égal à 6 et que, afin de tenir compte du fluage (tenue dans le temps) on appliquera la règle suivante:

$$\text{coefficient de sécurité} = \frac{2,5}{\rho}$$

avec paragraphe 3.6.3 page 20, $\rho=0.305$ pour durée de vie de 50 ans.

Le coefficient de sécurité à prendre est de $= 8.2$

5.4.2 - Marges par rapport à la rupture



Le tableau ci-dessus présente les marges par rapport à la rupture des premières couches et ruptures finales pour deux zones distinctes de la cuve. Les contraintes calculées ici sont dues à un chargement hydrostatique. Les points de calculs (couple de contraintes issu du calcul élément fini) affectés du coefficient de sécurité sont placés par rapport à l'enveloppe de rupture.

Le premier critère de détermination des ruptures correspond aux premières ruptures des couches. C'est un critère conservateur, il correspond à une analyse limite évitant toute dégradation dans la résine, dégradation pouvant correspondre seule-

ment au perlage ou aux microfuites. Ce critère est celui mentionné dans la norme ASME section X en particulier. Ces premières ruptures sont détectables par émission acoustique.

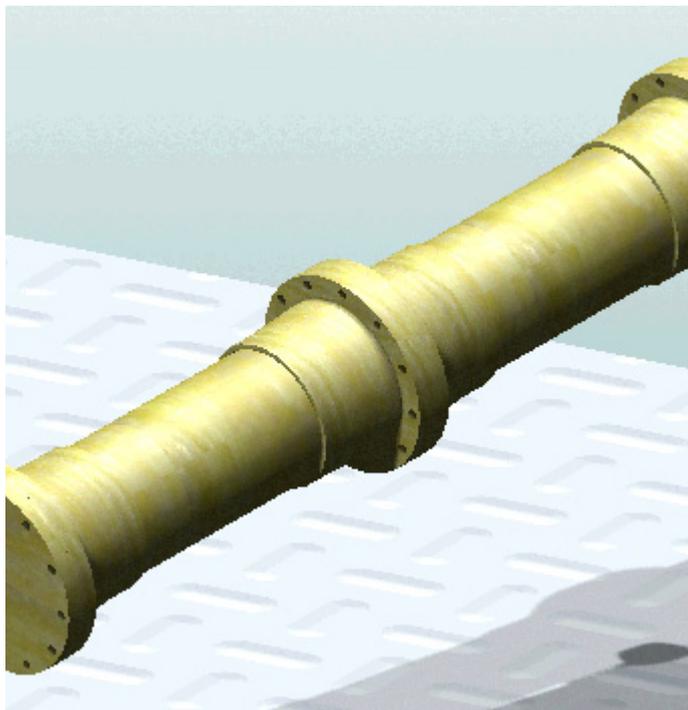
Le deuxième critère de détermination des ruptures correspond aux dégradations et ruptures finales des couches, donc du stratifié. Il correspond à une analyse limite permettant des dégradations de la résine, dégradations pouvant entraîner des microfuites. Ce sont ces ruptures qui sont observées lors d'essai en rupture finale d'éprouvettes, ces valeurs sont celles auxquelles fait plutôt référence la norme NFT 57900.

6 - Analyse d'une ligne de tuyauteries, accessoires et brides

6.1 - Tuyauteries composites



Doc.FPi



- **Fluide transporté:** la reprise d'humidité fait chuter la température de transition vitreuse de 30°C, le gonflement dû à l'humidité est une composante à ajouter à la dilatation thermique,
- **Pression:** 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 bloquages axiaux, fait chuter les propriétés limites apparentes du tuyau
- **Température:** un matériau réticulé à température basse peut conserver une sous-cuisson si les

composants de la réaction chimique disparaissent dans le temps

- **pression atmosphérique (vide), l'instabilité de flambage des parois en liée à la rigidité qui est faible, mais les épaisseurs sont plus grandes que l'acier.** Les effets Brazier, les instabilités de forme sont liées aux propriétés en flexion de la paroi,
- **Vitesse du fluide:** la mise à nu des fibres par arrachage du gel-coat permet une diffusion accélérée des fluides dans la paroi,
- **Environnement :** la calcination et la conductivité thermique faible est un atout pour l'utilisation au feu,
- **Diamètres intérieurs et tolérances:** l'épaisseur n'est pas une donnée stricte, le grammage ou quantité de fibres est important,
- **Possibilités d'inondations (poussée d'Archimède, tuyauterie vide):** la masse volumique est 4 fois plus faible que l'acier,
- **Déformation ou déplacement de bâtiments:** les bloquages s'appliquent sur un matériau souple, les efforts générés sont plus faibles que ceux donnés par l'acier,
- **Durée de service:** pour le verre E, en fatigue 10% de chute de propriétés par décade, pas de fluage en dessous de 30% de la limite statique suffisent au dimensionnement,
- **Polymérisation locale :** les collages sont sous-polymérisés parce qu'il leur faut un temps de cuisson à un niveau suffisant et pendant un temps suffisamment long pour intégrer le temps de réponse des parois alentour,
- **Caractéristiques des résines à valider par le fournisseur**
- **Les caractéristiques physico-mécaniques des stratifiés ne sont pas toutes mesurables mais doivent être estimées par calcul,**
- **Supportages :** des poinçonnements locaux de contact induisent des ruptures prématurées par cisaillement, il faut soigner la surface de contact entre la tuyauterie et l'étrier du supportage, calcul local en 2 ou 3D,
- **Les points fixes d'ancrage sont moins importants que pour l'acier à cause des rigidités rencon-**

trées avec le verre E couramment utilisé,

- Protection par des filets, les chutes d'objets endommagent localement par délaminage le matériau,

- ...

6.2 - Analyse d'un réseau de tuyauteries aérien

Les propriétés mécaniques des matériaux ayant été calculées, le calcul du réseau est abordable avec des modèles de type poutres. Les analyse de portions en coque ou en 3 D sont inévitables au niveau des coudes ou tés en particulier lors d'avaries.

Dans le cas d'un réseau de tuyauteries considéré comme un ensemble de poutres reliées entre elles. Il s'agit aussi d'utiliser les programmes de calcul classiques de poutres qui, en général ne prévoient pas le cas de poutres orthotropes ou poutres ayant une rigidité en torsion indépendante de la rigidité axiale. Pour de telles poutres où on ne peut entrer dans le programme qu'un module d'Young et un coefficient de Poisson, il s'agit de trouver des équivalences pour obtenir un comportement adéquat.

On va ainsi utiliser non pas une poutre prédéfinie à section circulaire mais une poutre plus générale symétrique. Dans le cas spécifique des tubes, on va tout d'abord entrer:

- le module réel axial E_1 , le moment d'inertie en flexion est bien celui du tube I et est donc bien celui lié à sa forme, soit

$$I=I_2=I_3= (\pi /64) (D_{\text{extérieur}}^4 - D_{\text{intérieur}}^4)$$

... pour un tube mince: $I_2=I_3 = \pi D^3h/8$

- entrer ensuite un moment d'inertie polaire J_{apparent} (différent de $2 I$) et tel que $J_{\text{apparent}} E_1 / (2(1+\nu)) = J_{\text{réel_tube}} G_{12}$. $J_{\text{réel_tube}} G = 2 I$. Le coefficient ν sera pris égal à 0.3. En conclusion on aura

$$J_{\text{apparent}} = J_{\text{réel_tube}} (G_{12}) / (E_1 / (2(1+\nu))).$$

- le facteur de cisaillement en y et z = 1/2

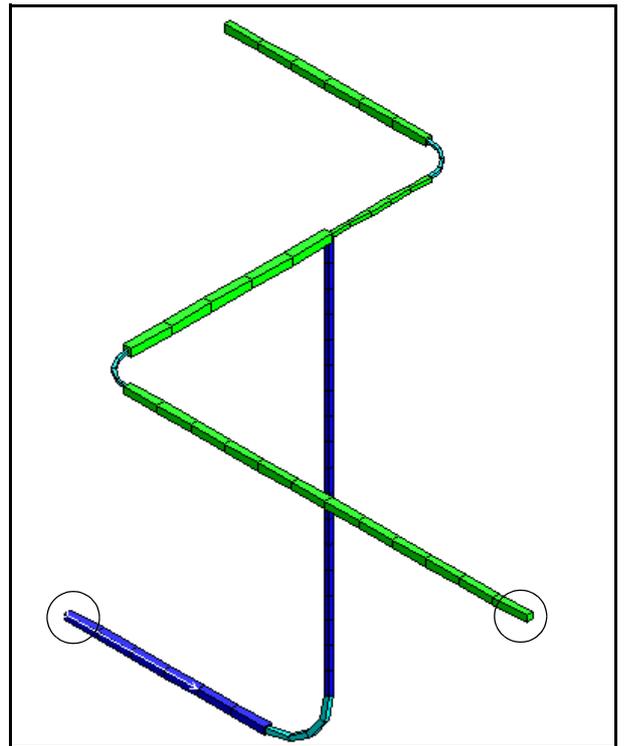
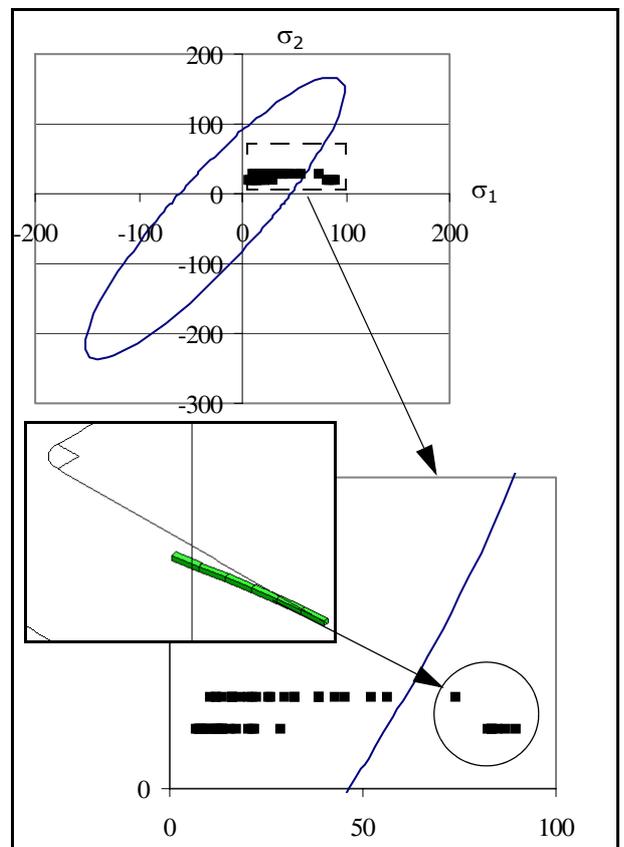


Figure 6.2.0.a - contraintes dans les tubes



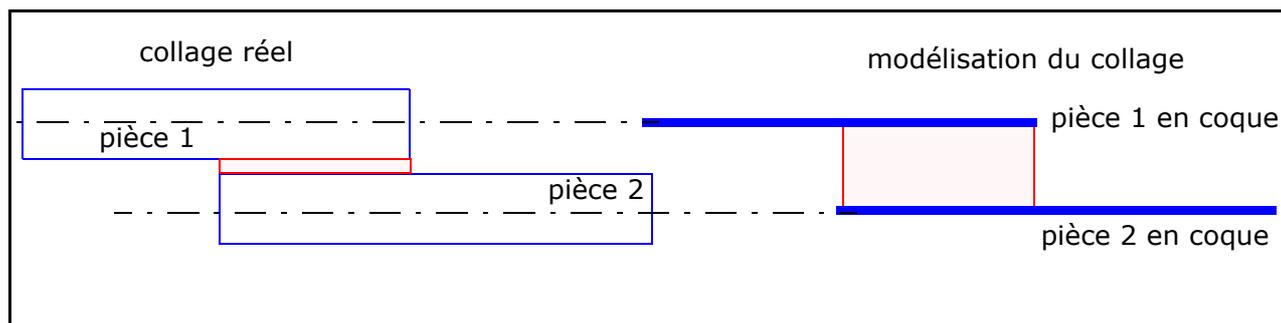
Les points de calcul sont placés par rapport à l'enveloppe de rupture de l'empilement (tube, coude) afin de justifier de son dimensionnement.

7 - Liaisons en chaudronnerie thermoplastique : collage et soudage.

La modélisation des liaisons par collage lorsque les deux pièces à assembler sont maillées en coques peut s'effectuer avec des éléments volumiques. Lorsque les deux coques sont représentées sur leur surface moyenne, l'épaisseur du collage ainsi modélisé se trouve supérieure à l'épaisseur réelle. Il convient donc de modifier les propriétés mécaniques du matériau de la colle afin de retrou-

ver les niveaux de contraintes réels dans le collage. Nous reprenons l'essai normalisé de qualification du collage pour valider cette modélisation.

Figure 7.0.0.a - position du problème



Un collage par simple recouvrement sollicité dans son plan correspond à une déformation de traction et de flexion des peaux. Les propriétés mécaniques de la colle avec une épaisseur de collage faible ont peu d'influence sur la valeur de ces déplacements. On doit cependant s'assurer que l'inertie créée par l'épaisseur de collage modélisé reste négligeable par rapport à l'inertie des peaux.

Par une équivalence sur l'inertie de flexion, on obtient les modules de traction apparents de la colle. L'épaisseur de colle modélisée plus grande que l'épaisseur réelle peut entraîner des déplacements par glissement plus importants que dans le cas réel. Les modules de cisaillement doivent être corrigés, ils sont augmentés dans le rapport des épais-

seurs réelles et modélisées. De même, le module de traction dans l'épaisseur du collage est modifié pour tenir compte des différences d'épaisseur.

Le modèle de référence est réalisé en éléments à 4 noeuds déformation plane. Il comporte 3 éléments dans l'épaisseur du collage. Le modèle de collage avec coque est réalisé avec des éléments volumiques (pavé) et 1 seul élément dans l'épaisseur.

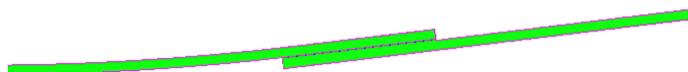
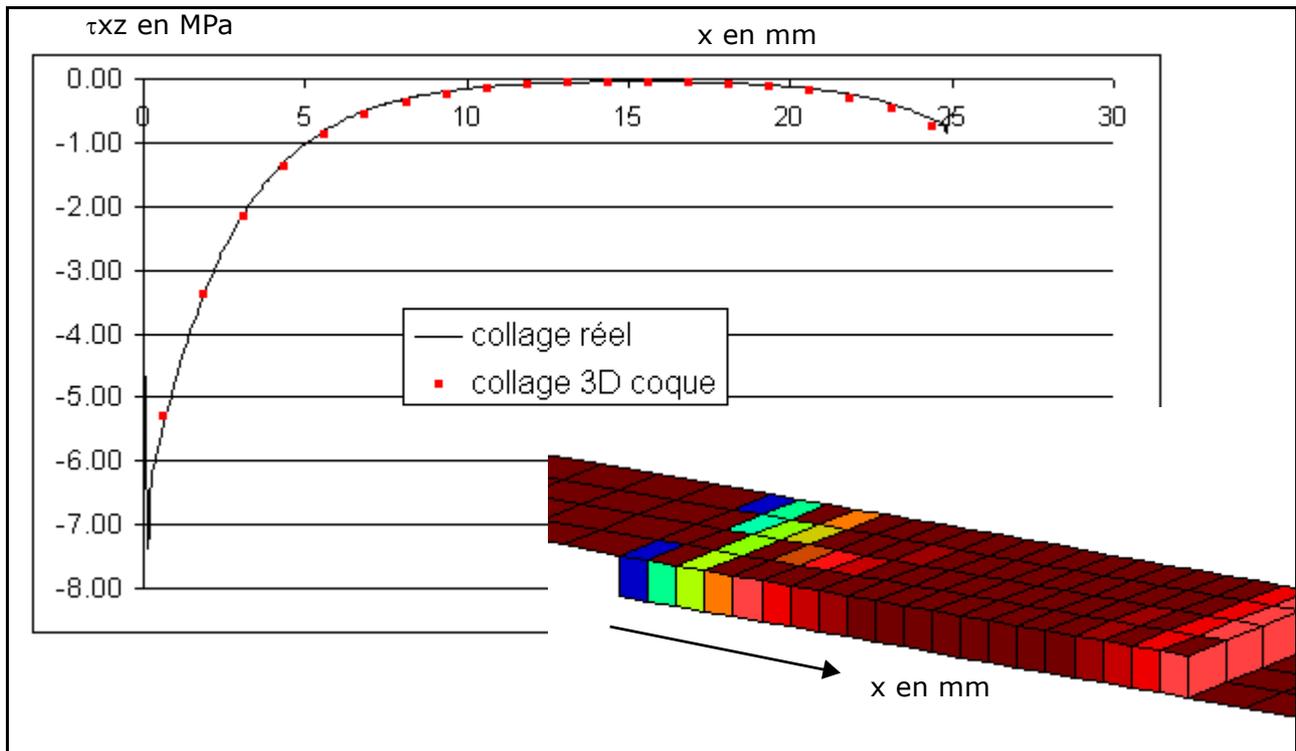
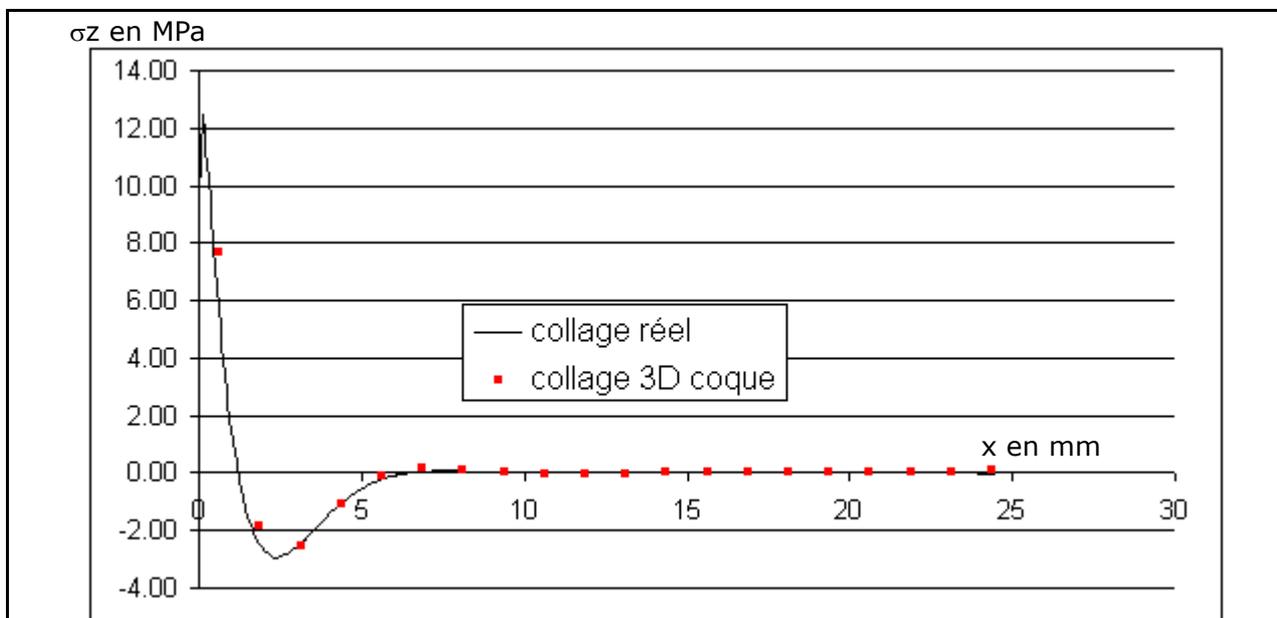


Figure C.7.0.0.b - Contraintes de cisaillement dans le collage


 Figure C.7.0.0.c - Contraintes de pelage (σ_z)


La modélisation de la colle peut s'effectuer avec différents type d'éléments finis. Nous avons testé dans le cas d'un calcul de collage avec simple recouvrement les configurations suivantes:

- collage modélisé en 3D avec des éléments de type Pavé (SOLID), 1 élément dans l'épaisseur du collage

- collage modélisé en 3D avec des éléments tétraédriques (TETRA4), 1 élément dans l'épaisseur du collage

- collage modélisé en 3D avec des éléments tétraédriques (TETRA4), 2 éléments dans l'épaisseur du collage

- collage modélisé en 3D avec des éléments tétraédriques avec 6 degrés de liberté

(TETRA4R), 1 élément dans l'épaisseur du collage

Les éléments SOLID et TETRA4 ont 3 degrés de liberté de translation par noeud. Les éléments TETRA4R ont 3 degrés de liberté de translation et 3 degrés de liberté de rotation par noeud.

Le collage de référence est modélisé en 2D déformation plane avec 3 éléments finis dans l'épaisseur du collage, l'épaisseur de colle est prise égale à 0.2mm.

Figure C.7.0.0.d - Contraintes de cisaillement dans le collage

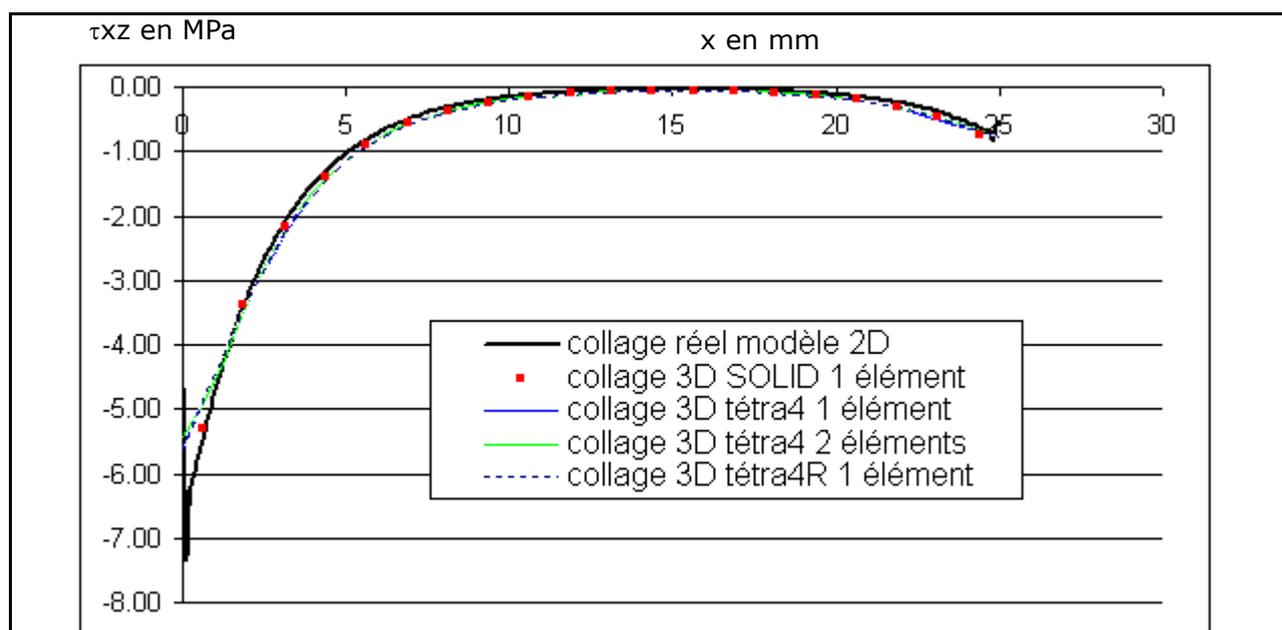
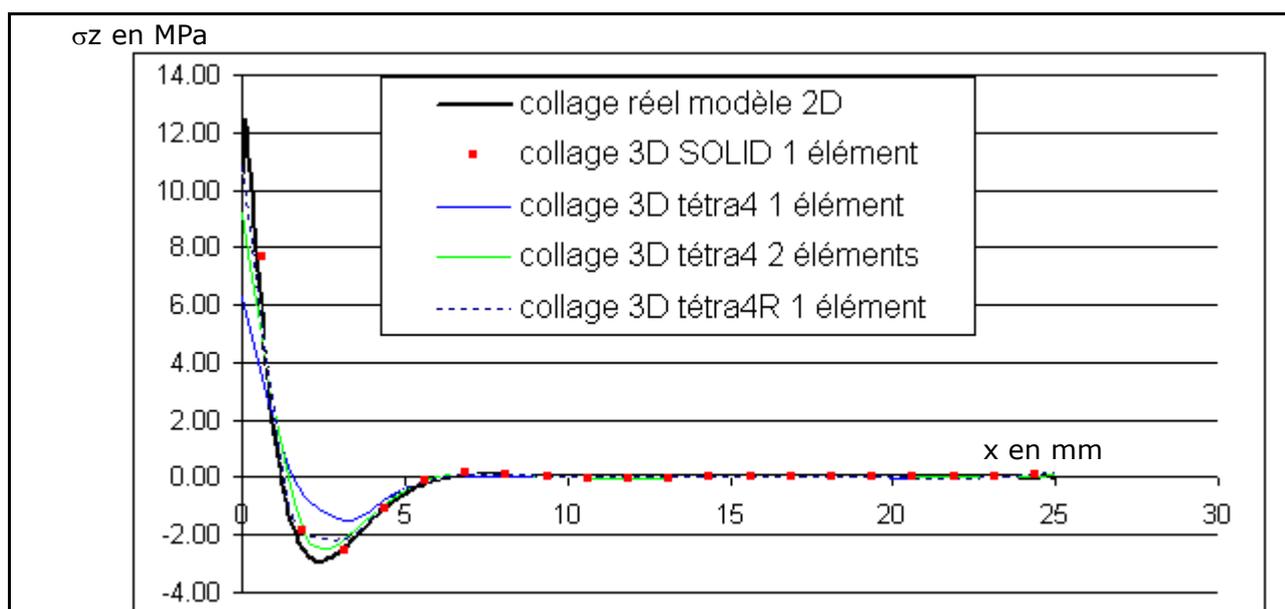


Figure C.7.0.0.e - Contraintes de pelage (σ_z)



On note donc peu de différences entre les 4 modèles en ce qui concerne le calcul des contraintes de cisaillement et de pelage dans la colle.

8 - Conclusion

Les démarches et les mises en pratique de "design by analysis" pour les appareils à pression composites ne sont pas spécifiques à ces matériaux.

La difficulté de mise en oeuvre de cette approche dans le cadre des matériaux composites réside dans le nombre de paramètres matériaux à manipuler.

Une solution consiste à retenir des valeurs de référence pour les constituants (fibre et résine). Les propriétés mécaniques des couches puis de l'empilement se calculent alors à partir de celles des constituants en utilisant des formulations adaptées. Cette démarche généraliste peut être intégrée dans des codes de construction.