

ONERA**Etude des Tuyauteries HP pour le banc SAAFIR****VALIDATION**

	Nom et fonction	Signature
Ecrit par	M. TUGAUT	
Vérifié par	J. WOIRET	
Approuvé par	JF. ROCHE	

IDENTIFICATION DU DOCUMENT

Référence	DTE 121 2024
Révision	A
Type de document	RAPPORT DE CALCULS
Catégorie du travail	Design Analysis

IDENTIFICATION DU PRODUIT

Désignation	Tuyauteries rigides et articulées haute pression et haute température
Référence	S1MA-8-15039-SP403-C
Famille de produit	Tuyauteries rigides

\\compiegne-data1\DIV_JONC\LA JONCHERE - GENERAL\Direction technique\Dossiers Techniques\Clients\ONERA\SOUFFLERIE
MODANE\ETUDES 2024\DTE 121-2024 revA - Etudes des tuyauteries HP pour le banc SAAFIR.docx

SOMMAIRE

	Page
SOMMAIRE.....	2
LISTE DES TABLEAUX.....	3
LISTE DES FIGURES.....	4
ACRONYMES & ABREVIATIONS.....	4
1. INTRODUCTION.....	5
2. REFERENCE DES DOCUMENTS.....	5
3. DESCRIPTION GENERALE.....	6
4. PREDIMENSIONNEMENT DES TUYAUTERIES.....	7
4.1. CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT.....	7
4.2. DEFINITION DES EPAISSEURS.....	7
4.2.1 Formules.....	7
4.2.2 Contrainte admissible.....	8
4.2.3 Calcul des épaisseurs.....	9
5. ISOLATION DES TUYAUTERIES.....	10
6. ETUDE DE LA TUYAUTERIE ARTICULEE.....	11
6.1. ETUDE CINEMATIQUE.....	11
6.2. ANALYSE LCF.....	14
6.2.1 Présentation du modèle.....	14
6.2.2 Contraintes admissibles.....	18
6.2.3 Résultats.....	20
6.3. ANALYSE MODALE.....	22
6.4. PROPOSITIONS D'AMELIORATIONS.....	24
6.4.1 Amélioration du support de biellettes.....	24
6.4.2 Système de supportage.....	24
7. ETUDE DE LA TUYAUTERIE FIXE.....	25
7.1. PROPOSITION DE CONCEPTION.....	25
7.1.1 Tuyauterie A.....	26
7.1.2 Tuyauterie B.....	27
7.1.3 Tuyauterie C.....	28
7.1.4 Structure.....	29
7.2. ETUDE LCF.....	30
7.2.1 Données d'entrée et Contraintes admissibles.....	30
7.2.2 Présentation du modèle.....	31
7.2.3 Résultats.....	32
8. CALCUL DES PERTES DE CHARGE.....	36
9. CONCLUSION.....	38
10.ANNEXES.....	39
10.1. EXTRAITS DE LA NORME NF EN 10253-4.....	39
10.2. FICHE TECHNIQUE DU MIN-K®.....	41

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1 : Conditions de fonctionnement de la tuyauterie HP	7
Tableau 2 : Coefficient de réduction en fonction du nombre de cycles	8
Tableau 3 : Caractéristiques de l'Inconel 625® issues du MMPDS [6]	8
Tableau 4 : calcul des épaisseurs minimales	9
Tableau 5 : Epaisseurs standards utilisées	9
Tableau 6 : Propriétés mécanique de l'alliage de Nickel 625 et de l'inox AISI 321 issues du MMPDS [6] implémentées dans le modèle	14
Tableau 7 : résultats et marges des conditions LCF pour la configuration en alliage de Nickel 625	20
Tableau 8 : résultats et marges des conditions LCF pour la configuration en Inox	21
Tableau 9 : Premières fréquences propres de la tuyauterie mobile à $\alpha=-3^\circ$	22
Tableau 10 : Nomenclature de la tuyauterie A	26
Tableau 11 : Nomenclature de la tuyauterie B	27
Tableau 12 : Nomenclature de la tuyauterie C	28
Tableau 13 : Propriétés mécanique de l'alliage de Nickel 625 et de l'inox AISI 321 issues du MMPDS [6] implémentées dans le modèle	30
Tableau 14 : Contraintes maxi et marges pour la configuration alliage de Nickel 625	32
Tableau 15 : Contraintes maxi et marges pour la configuration Inox 321	33
Tableau 16 : Efforts et moments dans le repère global pour la configuration alliage de Nickel 625	33
Tableau 17 : Efforts et moments dans le repère global pour la configuration Inox 321	33
Tableau 18 : Premières fréquences de résonance de la tuyauterie fixe	34
Tableau 19 : données considérées pour le calcul des pertes de charge	36
Tableau 20 : Calcul des pertes de charge de la tuyauterie amont	36
Tableau 21 : Calcul des pertes de charge de la tuyauterie A	37
Tableau 22 : Calcul des pertes de charge de la tuyauterie B	37
Tableau 23 : Calcul des pertes de charge de la tuyauterie C	37
Tableau 24 : Calcul des pertes de charge de la tuyauterie mobile	37

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 : Représentation du banc d'essais	6
Figure 2 : Extrait de la feuille de calculs de l'épaisseur d'isolation	10
Figure 3 : accommodation des rotations autour de α et β	11
Figure 4 : Schéma de la cinématique de la tuyauterie autour de α	12
Figure 5 : Graphique des angles ε , γ et δ en fonction de α dans l'intervalle de fonctionnement $[-3^\circ:10^\circ]$	13
Figure 6 : Maillage de la tuyauterie	14
Figure 7 : soudure bout à bout	15
Figure 8 : soudure d'angle	15
Figure 9 : modélisation des joints tournants	16
Figure 10 : Conditions aux limites	17
Figure 11 : Chargements implémentés	17
Figure 12 : Courbe de Wöhler de l'alliage de Nickel 625 à 350°C – Stress ratio R=0	18
Figure 13 : Courbe de Wöhler de l'inox AISI 321 à 400°C – Stress ratio R=0	18
Figure 14 : Stress ratio R = 0	19
Figure 15 : Déformée modale F1 = 4Hz.....	22
Figure 16 : Déformée modale F2 = 14Hz.....	22
Figure 17 : Déformée modale F3 = 20 Hz.....	23
Figure 18 : Déformée modale F4 = 29 Hz.....	23
Figure 19 : Doubtantes et brackets	24
Figure 20 : Proposition de supportage	24
Figure 21 : vue d'ensemble de la tuyauterie rigide et de sa structure	25
Figure 22 : Vue de la tuyauterie A	26
Figure 23 : Vue de la tuyauterie B	27
Figure 24 : schéma pour la longueur de la tuyauterie B	27
Figure 25 : Vue de la tuyauterie C	28
Figure 26 : vue de la structure	29
Figure 27 : Solutions de rupture de pont thermique.....	29
Figure 28 : vue du modèle CAEPIPE®	31
Figure 29 : Vue avec rendu du modèle CAEPIPE®	31
Figure 30 : Nœuds du modèle CAEPIPE ®	32
Figure 31 : Fréquence de résonance F1	34
Figure 32 : Fréquence de résonance F2.....	34
Figure 33 : Fréquence de résonance F3.....	35
Figure 34 : Fréquence de résonance F4.....	35
Figure 35 : Fréquence de résonance F5.....	35
Figure 36 : Tuyauteries HP	36

ACRONYMES & ABREVIATIONS

SAO Safran Aerosystems

1. INTRODUCTION

Ce rapport présente l'étude réalisée sur les tuyauteries HP du banc SAAFIR. D'une part la tuyauterie mobile avec l'étude cinématique, l'étude de tenue en fatigue et l'analyse modale. Ensuite, la tuyauterie rigide, la conception, le supportage, l'étude de tenue en fatigue et l'analyse modale.

2. REFERENCE DES DOCUMENTS

ID	Titre / Description	Reference	Révision
[1]	Spécification Technique de Besoin – Interfaces entre les tuyauteries du banc SAAFIR et leurs structures de supportage	S1MA-8-15039-SP403	C
[2]	Maquette : 20241025 - Fourniture ONERA pour etude conduit banc essais.zip	/	/
[3]	ETR joint tournant DN80	DTE 045-2020	A
[4]	Mobile ducts for S1MA	DTE 090-2017	E
[5]	Code de construction des Tuyauteries Industrielles	CODETI	2006
[6]	Metallic Materials Properties Development and Standardization	MMPDS	10 (avril 2015)
[7]	Norme : Raccords à soudés bout à bout	NF EN 10253-4	2009-03
[8]	Norme : Brides circulaires pour tubes, appareils de robinetterie, raccords et accessoires, désignées PN	NF EN 1092-1	2018-04

3. DESCRIPTION GENERALE

La direction des souffleries de l'ONERA développe un banc d'essais permettant de tester un moteur alimenté par une turbine à air haute pression et haute température. De plus, pour les besoins des essais, le banc doit pouvoir se déplacer suivant deux axes de rotation pendant l'essai. Par conséquent, une partie de la tuyauterie d'alimentation (HP) doit pouvoir s'accommoder de ces déplacements tout en permettant l'alimentation en air.

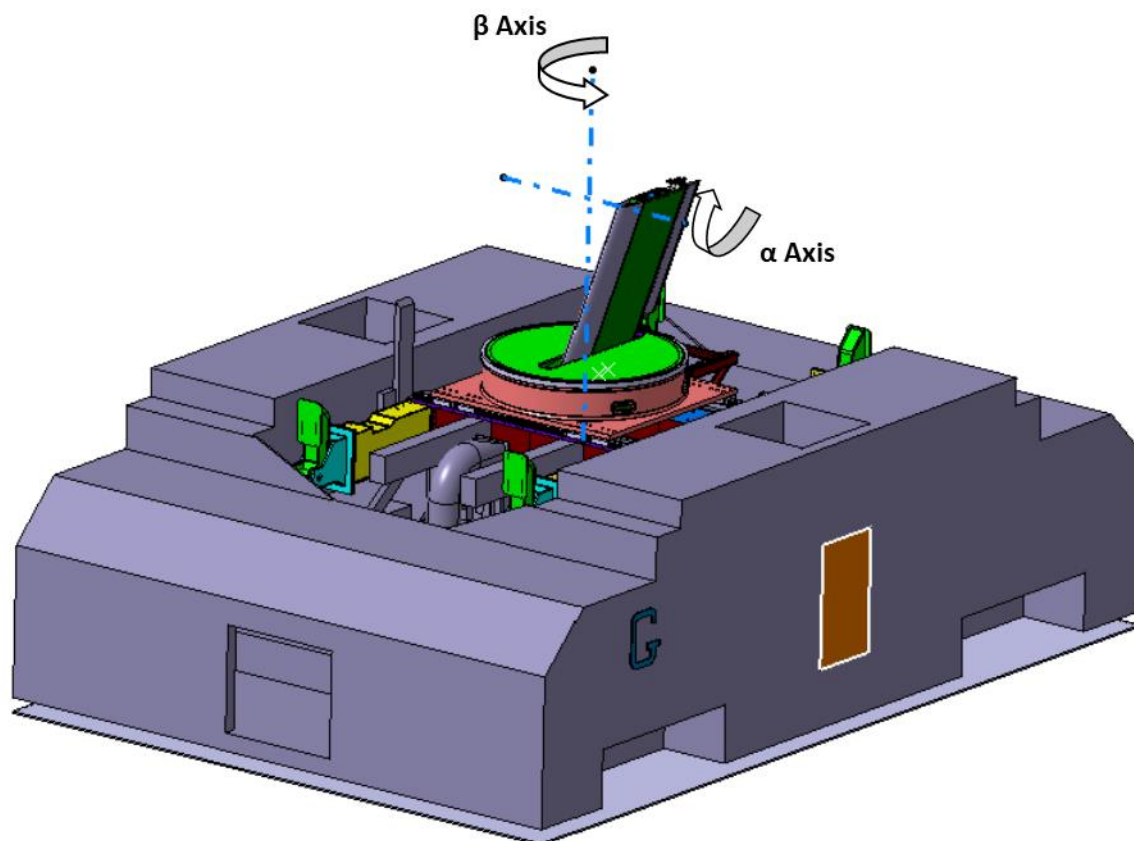


Figure 1 : Représentation du banc d'essais

4. PREDIMENSIONNEMENT DES TUYAUTERIES

4.1. Conditions de fonctionnement

Les conditions de fonctionnement de la tuyauterie HP issues de la spécification [1] sont rappelées ci-dessous :

Paramètre	valeur	Unité
Température	377	°C
Pression	50	Bar relatif
Durée de vie	10 000	cycles

Tableau 1 : Conditions de fonctionnement de la tuyauterie HP

Considérant ces conditions de fonctionnement et particulièrement la température, SAO a choisi d'utiliser des tuyauteries en Inconel 625® avec une alternative en Inox 321 dans la suite de l'étude.

4.2. Définition des épaisseurs

4.2.1 Formules

Le calcul des épaisseurs de tubes droits et coudés présentés ci-dessous sont réalisés selon le CODETI 2006 [5] :

- Epaisseur mini des parties droites : $e = \frac{PD_e}{2fz+P}$
- Epaisseur mini des coudes à l'intrados : $e_{int} \geq e \frac{\frac{R_c}{D_e}-0.25}{\frac{R_c}{D_e}-0.5}$
- Epaisseur mini dans les coudes à l'extrados : $e_{ext} \geq e \frac{\frac{R_c}{D_e}+0.25}{\frac{R_c}{D_e}+0.5}$
- Epaisseur mini des réductions concentriques : $e = \frac{PD_e}{2fz+P} \frac{1}{\cos(\alpha)}$

Avec : P = Pression (MPa)

D_e = Diamètre extérieur du tube (mm)

f = Contrainte admissible (MPa)

z = Coefficient de soudure

R_c = Rayon de cintrage (mm)

α = Demi-angle au sommet du cône de la réduction

4.2.2 Contrainte admissible

Pour le Nickel et les alliages de Nickel comme l'Inconel 625® le CODETI [5] défini la contrainte admissible à considérer en fonctionnement normale par :

$$MIN \left\{ \left(\frac{R_{p0.2}^t}{1.5} \right); \left(\frac{R_m}{2.4} \right) \right\}$$

Pour les aciers inoxydables austénitiques comme l'Inox 321, le CODETI [5] défini la contrainte admissible à considérer en fonctionnement normale par :

$$\left(\frac{R_m^t}{3} \right)$$

A cette contrainte, un coefficient de réduction est appliqué afin de considérer la fatigue :

Nombre de cycles	Coefficient
0 à 7 000	1,0
7 000 à 14 000	0,9
14 000 à 22 000	0,8
22 000 à 45 000	0,7
45 000 à 100 000	0,6
100 000 à 200 000	0,5

Tableau 2 : Coefficient de réduction en fonction du nombre de cycles

Les données de l'alliage de Nickel 625 et de l'Inox 321 issues du MMPDS [6] considérées pour l'analyse sont présentées ci-dessous :

Température	Alliage de Nickel 625		Inox	
	Limite élastique Rp _{0.2}	Limite à rupture Rm	Limite élastique Rp _{0.2}	Limite à rupture Rm
20°C	414 MPa	827 MPa	151 MPa	468 MPa
377°C	293 MPa	736 MPa	91 MPa	314 MPa

Tableau 3 : Caractéristiques de l'Inconel 625® issues du MMPDS [6]

La contrainte admissible à 377°C pour l'alliage de Nickel 625 est donc : $f_{inco} = MIN \left\{ \left(\frac{R_{p0.2}^t}{1.5} \right); \left(\frac{R_m}{2.4} \right) \right\} \times 0.9 = 175 \text{ MPa}$

La contrainte admissible à 377°C pour l'inox est donc : $f_{inox} = \left(\frac{314}{3} \right) \times 0.9 = 94 \text{ MPa}$

4.2.3 Calcul des épaisseurs

						Alliage de Nickel 625		Inox	
		D _e (mm)	R _c (mm) ⁽¹⁾	P (MPa)	z ⁽²⁾	f (MPa)	e mini (mm)	f (MPa)	e mini (mm)
DN 80	Partie droite	88.9	/	5	1	175	1.26	94	2.31
	Intrados Coude	88.9	114	5	1	175	1.66	94	2.50
	Extrados Coude	88.9	114	5	1	175	1.07	94	2.16
DN 200	Partie droite	219.1	/	5	1	175	3.09	94	5.68
	Réduction concentrique ⁽³⁾	219.1	/	5	1	175	3.14	94	6.02

Tableau 4 : calcul des épaisseurs minimales

(1) La valeur du rayon de courbure est considérée à 3D suivant la norme NF EN 10253-4 (voir Annexe 10.1). Cette valeur est identique aux coudes présents dans la maquette [2].

(2) Le coefficient de soudure considéré z=1 implique l'approvisionnement d'un tube sans soudure ou un contrôle continu de fabrication s'il y a soudure (longitudinale ou hélicoïdale).

(3) Les dimensions de la réduction concentrique sont issues de la norme NF EN 10523-4 (voir Annexe 10.1) et de la maquette [2]

Considérant ces épaisseurs minimales calculées, SAO propose d'utiliser les épaisseurs standard basées sur la norme NF EN 10523-4 comme suivant :

		Epaisseur pour l'alliage de Nickel 625	Epaisseur pour l'Inox
DN 80	Partie droite	2.0 mm	3.2 mm
	Coude	2.0 mm	3.2 mm
DN 200	Partie droite	3.6 mm	6.3 mm
	Réduction concentrique	3.6 mm	6.3 mm

Tableau 5 : Epaisseurs standards utilisées

5. ISOLATION DES TUYAUTERIES

Selon la spécification [1], l'ONERA souhaite isoler les tuyauteries pour obtenir une température de peau maxi de 60°C. SAO a calculé l'épaisseur nécessaire pour répondre à ce requis en considérant du Min-K F351 ® (voir la fiche du produit en annexe 10.2). L'épaisseur minimum d'isolation est calculée à l'aide du code interne Iso-Calculator :

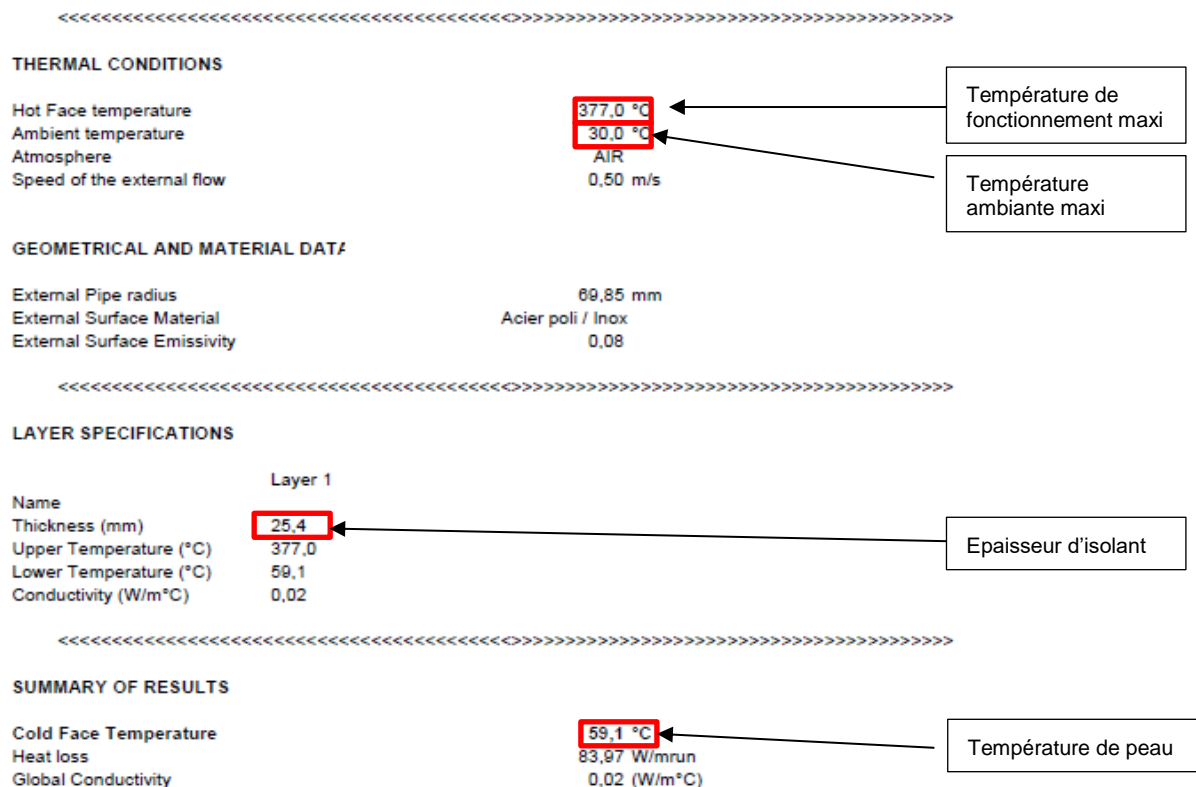


Figure 2 : Extrait de la feuille de calculs de l'épaisseur d'isolation

Ainsi, en considérant la température maximale de fonctionnement de 377°C et la température ambiante de 30°C, une épaisseur de 25.4mm (1") de Min-K F351 ® donne une température de peau de 59°C.

La masse de cette épaisseur d'isolation sera prise en compte dans la suite de l'analyse.

6. ETUDE DE LA TUYAUTERIE ARTICULEE

6.1. Etude cinématique

Pour permettre les mouvements d'incidence et de dérapage, la partie mobile de la tuyauterie HP est constituée de plusieurs joints tournants. Un joint tournant positionné dans l'axe Z (et toujours aligné sur l'axe de rotation de dérapage β) permet la cinématique de la tuyauterie pour les mouvements de dérapage et trois joints tournants dont les axes sont parallèles, permettent la cinématique de la tuyauterie pour les mouvements d'incidence.

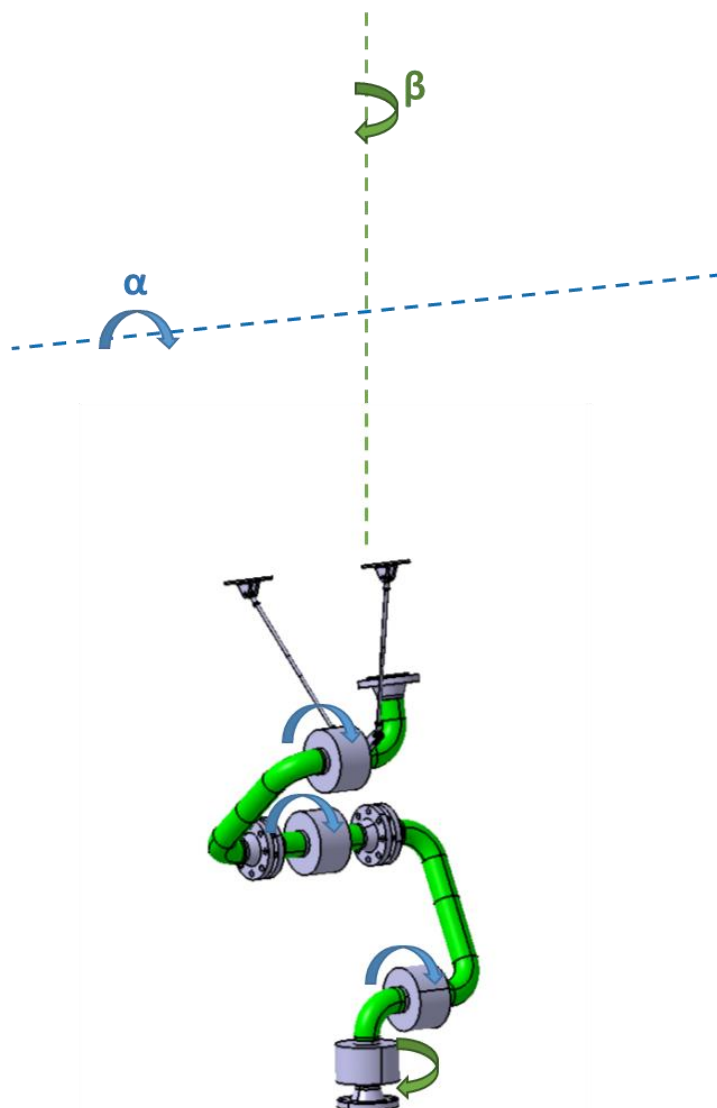


Figure 3 : accommodation des rotations autour de α et β

Les mouvements de dérapage se résument à une rotation de toute la partie articulée de la tuyauterie HP autour de l'axe β .

Les mouvements d'incidence impliquent l'articulation de la tuyauterie par la rotation des trois joints tournants. Cette cinématique peut être étudiée dans le plan normal à l'axe de ces joints tournants :

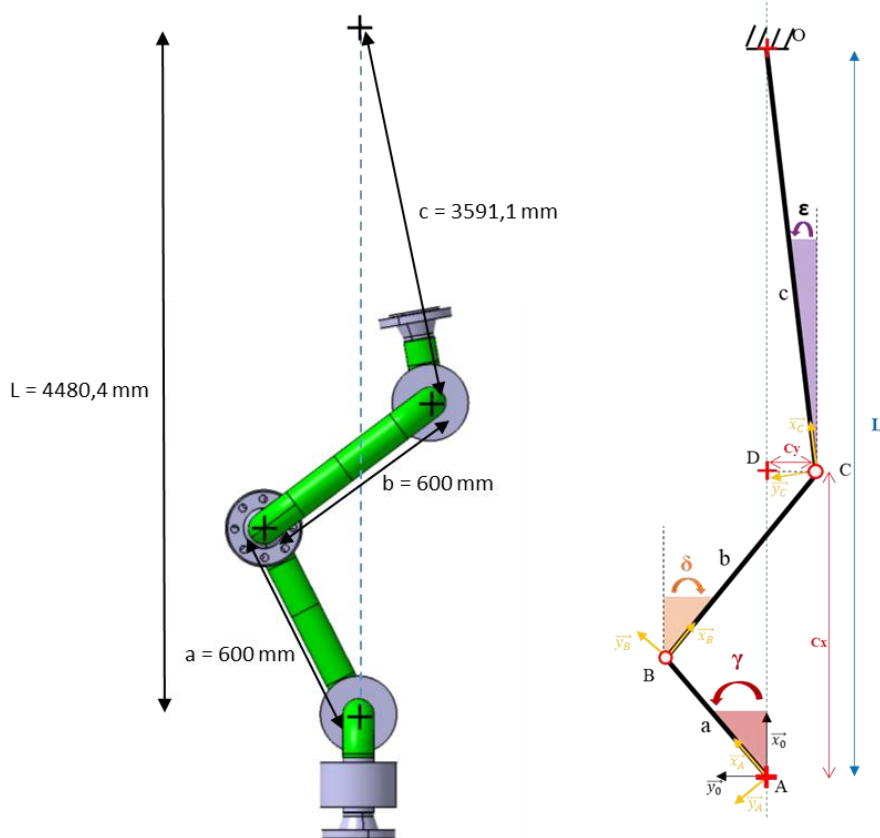


Figure 4 : Schéma de la cinématique de la tuyauterie autour de α

Connaissant la position de la tuyauterie pour un angle $\alpha = -3^\circ$ et $\alpha = 10^\circ$, la relation entre ϵ et α peut s'écrire :

$$\epsilon(\alpha) = \alpha - 6.699$$

En reprenant la méthodologie de résolution détaillée dans le rapport [4], les équations décrivant la cinématique des angles ϵ , δ et γ en fonction de α sont représentées dans l'intervalle $[-3^\circ : 10^\circ]$ sur le graphique suivant.

Graphes des angles ε , γ et δ en fonction de α dans l'intervalle fonctionnel du système
(valeurs en degrés)

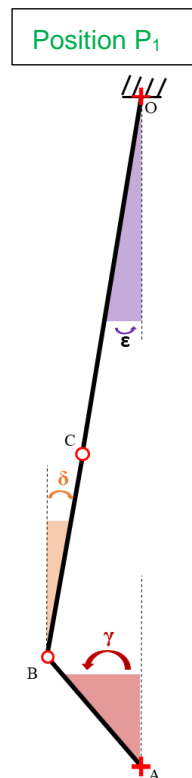
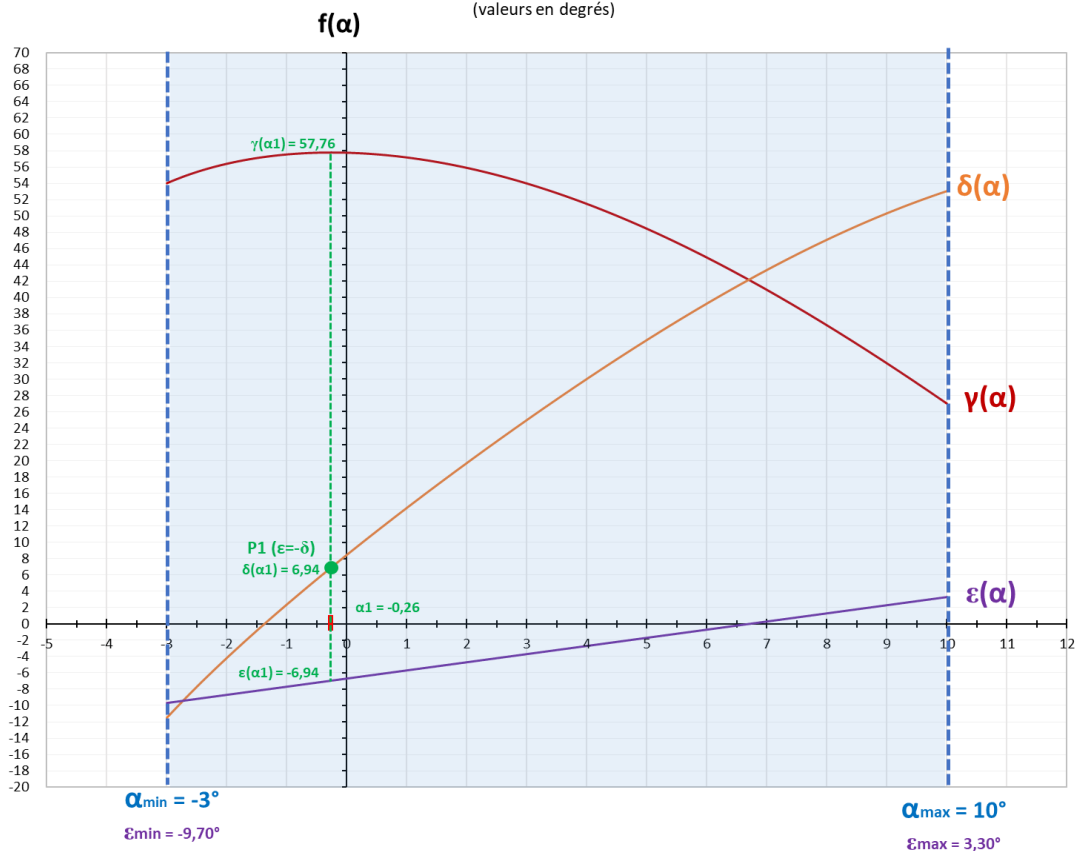


Figure 5 : Graphique des angles ε , γ et δ en fonction de α dans l'intervalle de fonctionnement $[-3^\circ:10^\circ]$

A la position P_1 ($\alpha = -0.26^\circ$) les points B, C et O sont alignés, par conséquent $\varepsilon = -\delta$ et γ atteint sa valeur maximale de 57.76° . Dans cette position, la rotation autour de α n'est pas bloquée et il n'y a pas de risque de basculement d'un des tubes. Cette position P_1 n'est donc pas critique.

6.2. Analyse LCF

L'analyse de la tenue en fatigue de la tuyauterie articulée a été réalisée par éléments finis à l'aide du logiciel ABAQUS 2019. Les deux configurations Alliage de Nickel et Inox présentées §4 sont étudiées

6.2.1 Présentation du modèle

Matériaux

Les propriétés de l'alliage de Nickel 625 et de l'Inox 321 ci-dessous ont été implémentées dans le modèle :

Matériau	Température T	Densité ρ	Coefficient de Poisson ν	Module d'Young E	Coefficient de dilatation thermique α
Alliage de Nickel 625	20°C	8442 kg/m ³	0.28	205 463 MPa	12.9 E ⁻⁶ °C ⁻¹
	377°C		0.28	172 589 MPa	13.5 E ⁻⁶ °C ⁻¹
Inox 321	20°C	7850 kg/m ³	0.3	199 948 MPa	15.5 E ⁻⁶ °C ⁻¹
	377°C		0.3	175 954 MPa	18.0 E ⁻⁶ °C ⁻¹

Tableau 6 : Propriétés mécanique de l'alliage de Nickel 625 et de l'inox AISI 321 issues du MMPDS [6] implémentées dans le modèle

Nota : sur les parties droites et coudées, la masse de l'isolation est considérée avec une densité de 256kg/m³ et une épaisseur de 25.4 mm (1").

Maillage

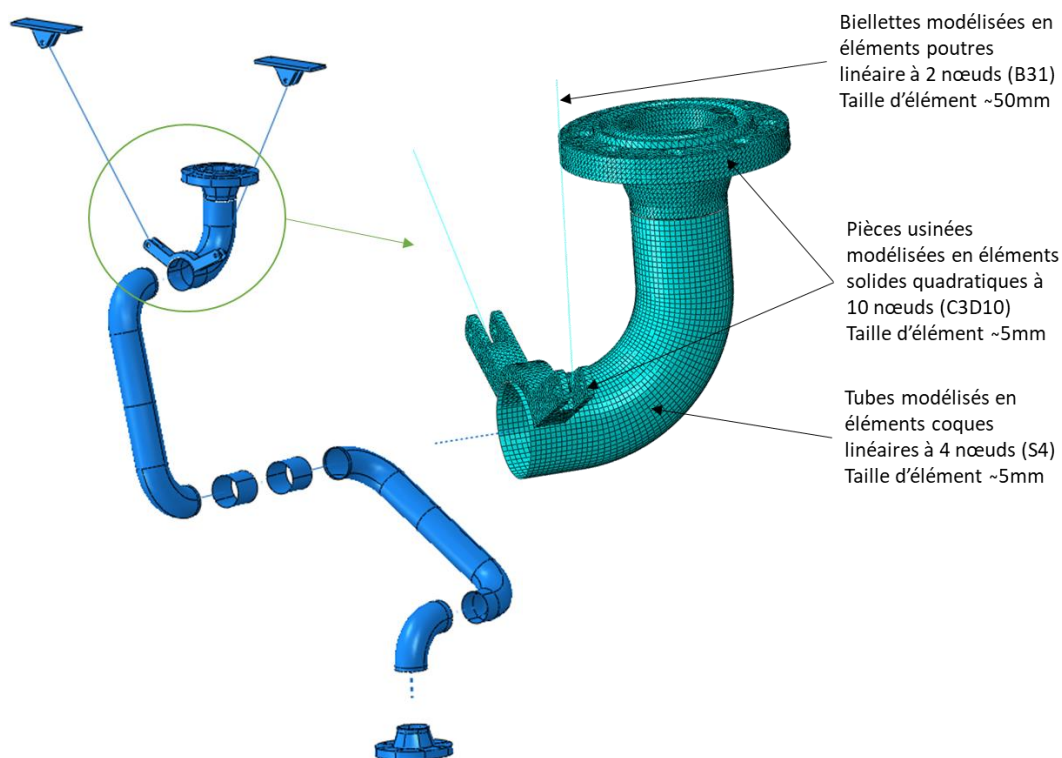


Figure 6 : Maillage de la tuyauterie

Soudures

Dans le modèle éléments finis, les soudures ne sont pas modélisées :

- Pour les soudures bout à bout (assemblage des tubes) les pièces sont assemblées sans discontinuité du maillage. Pour prendre en compte la singularité géométrique de la soudure (cordon de soudure et désaccostage) un facteur +10% de la contrainte calculée est appliqué dans la zone.

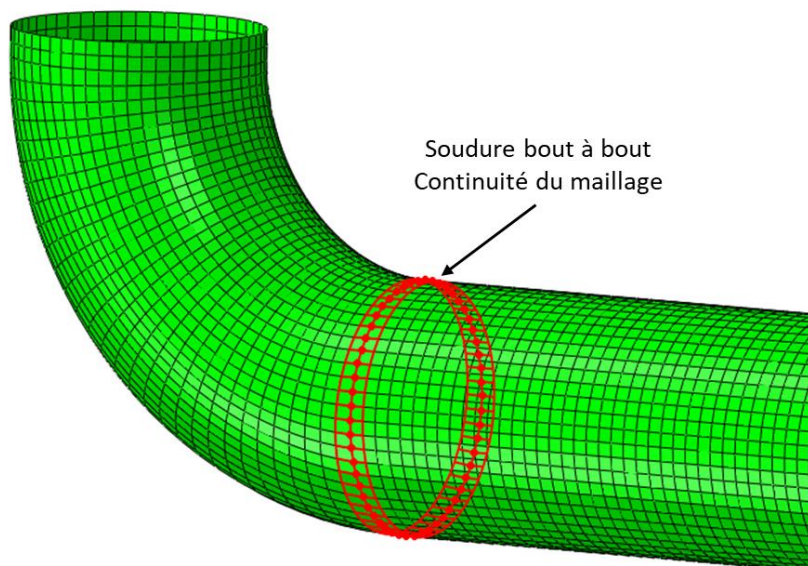


Figure 7 : soudure bout à bout

- Pour les soudures d'angles, les pièces sont assemblées par un contact "collé". Les nœuds des surfaces en contact sont liés. Dans cette configuration, la géométrie est plus sévère qu'avec le cordon de soudure, aucun facteur n'est appliqué sur la contrainte.

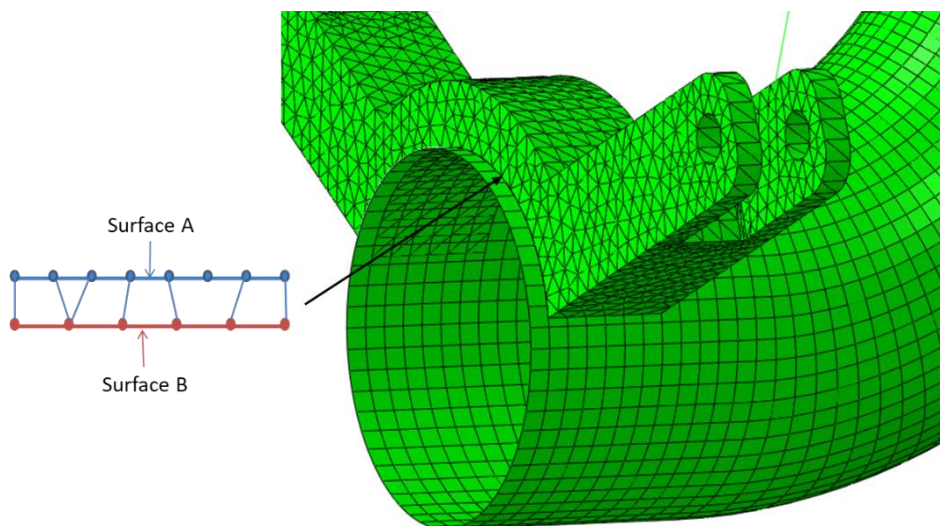


Figure 8 : soudure d'angle

Dans ces deux configurations, une zone de matière de base autour du cordon de soudure voit ses propriétés affectées par la chaleur du procédé : c'est la Zone Affectée Thermiquement (ZAT). Pour prendre en compte ces changements de propriétés, un facteur de -20% est appliqué sur la contrainte admissible.

Jointes tournants et brides

Pour simplifier le modèle, les jointes tournants sont modélisés par des connecteurs équivalent de type "hinge" permettant la rotation. La masse du joint tournant de 33 kg est modélisée par une masse ponctuelle équivalente appliquée au centre du joint. La connexion avec les tubes se fait par des connecteurs rigides qui autorisent la dilatation radiale des tubes sans contrainte.

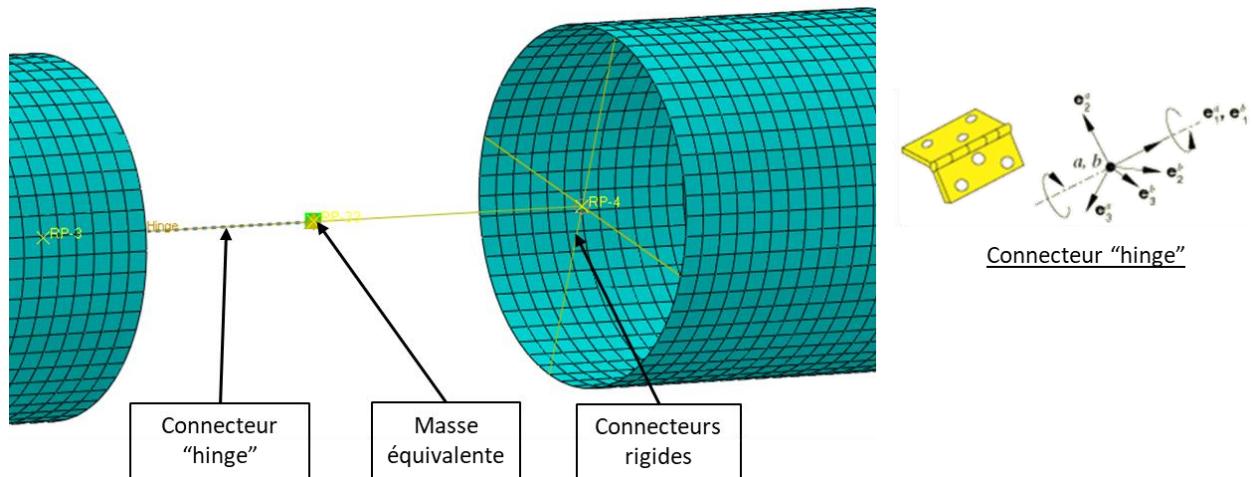
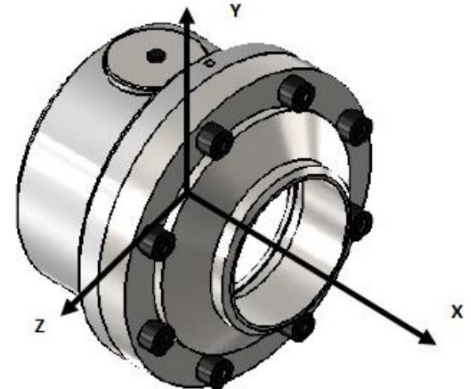


Figure 9 : modélisation des jointes tournants

Degrés de liberté du connecteur « hinge »					
Translation			Rotation		
X	Y	Z	XX	YY	ZZ
Bloqué	Bloqué	Bloqué	Libre (avec couple frottement 400 N.m*)	Bloqué	Bloqué

* La valeur du couple de frottement utilisée dans cette étude provient du rapport d'essais DTE 045 2020 [3].



Les brides sont modélisées par des éléments poutre de raideurs, dilatation thermique et masse équivalentes. Celles-ci sont connectées aux tubes par des connecteurs rigides qui autorisent la dilatation radiale des tubes sans contrainte.

Conditions aux limites et chargements

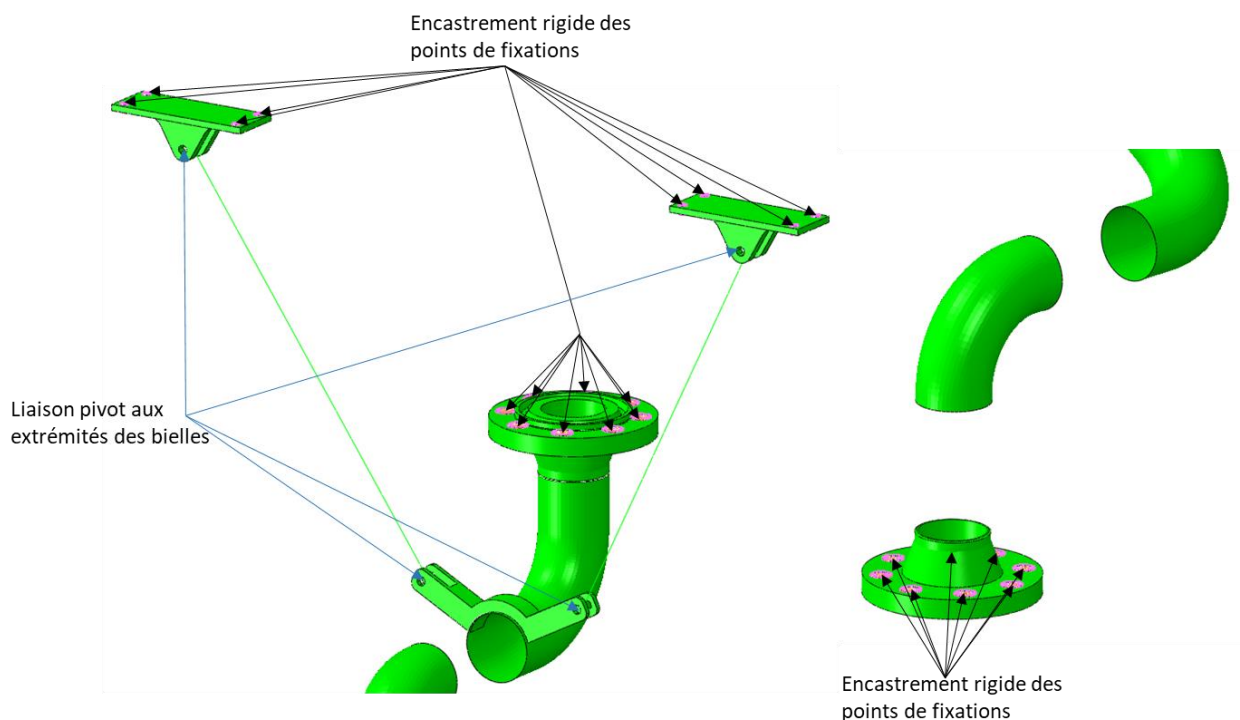


Figure 10 : Conditions aux limites

Les chargements suivants sont appliqués au modèle : La gravité suivant l'axe -Z, la pression interne à la tuyauterie et la température sur l'ensemble du système.

Chargement	Valeur	Unité
Gravité	9.81	m/s ²
Pression	50	bar
Température	377	°C

Figure 11 : Chargements implémentés

Il est à noter que différentes positions de l'angle α ont été étudiées, la configuration $\alpha = -3^\circ$ est présentée dans ce rapport car présente les contraintes les plus importantes.

6.2.2 Contraintes admissibles

Conformément à la spécification [1], une durée de vie de 10 000 cycles est requise, par conséquent, la contrainte admissible considérée pour cette analyse est issue de la courbe de Wöhler Figure 12 ci-dessous :

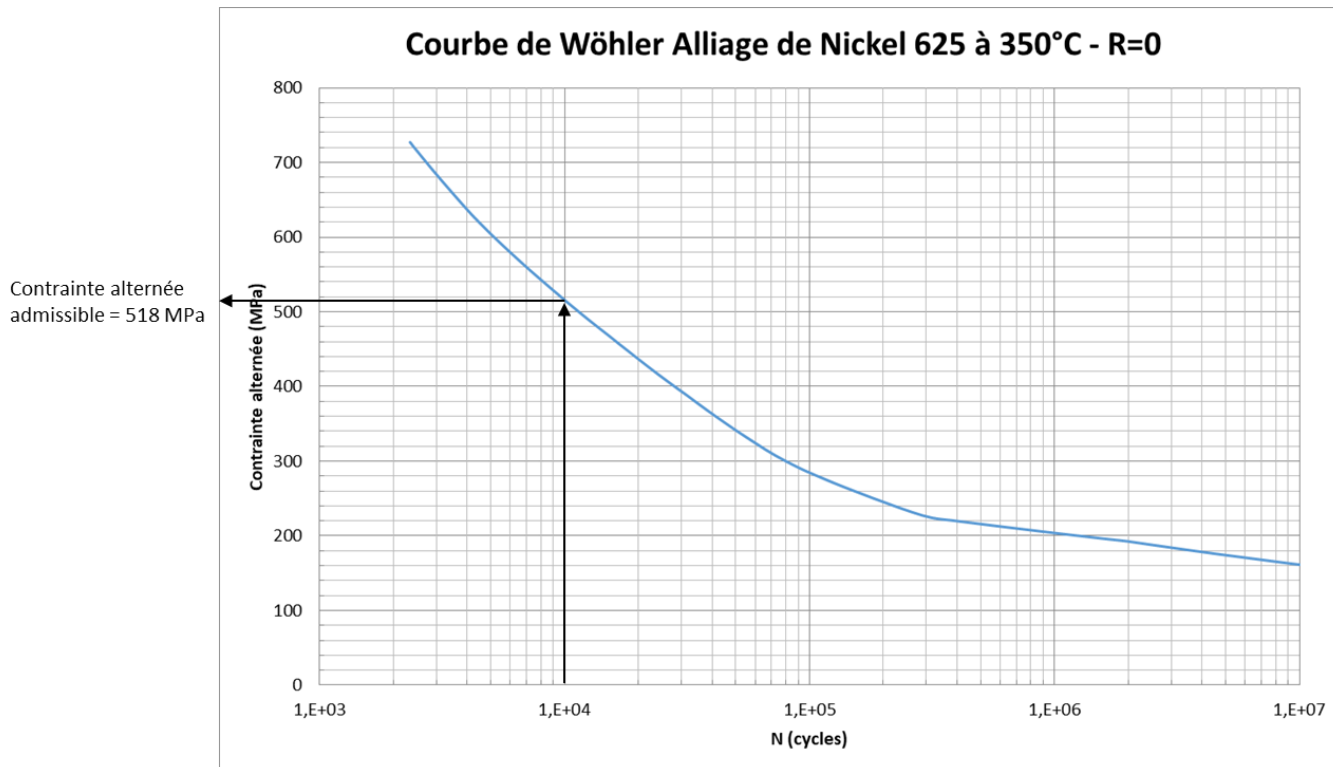


Figure 12 : Courbe de Wöhler de l'alliage de Nickel 625 à 350°C – Stress ratio R=0

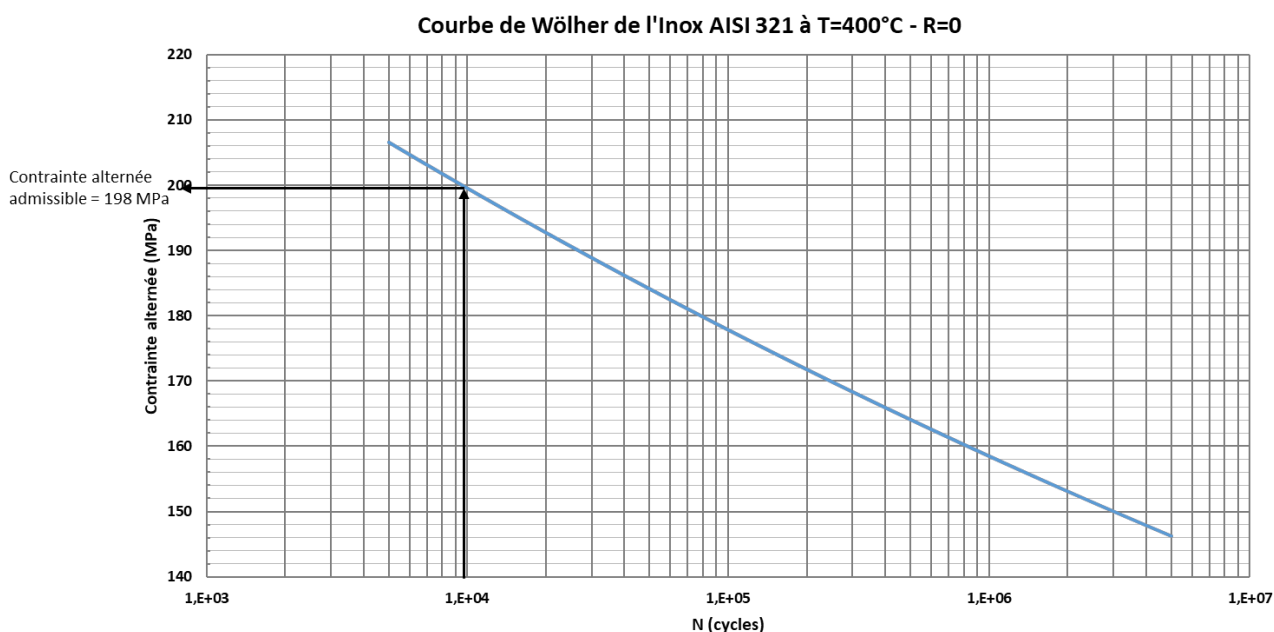


Figure 13 : Courbe de Wöhler de l'inox AISI 321 à 400°C – Stress ratio R=0

$$\sigma_{alt} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{\sigma_{max}}{2}$$

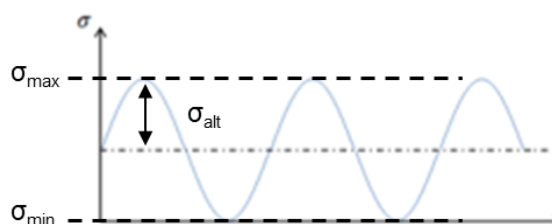


Figure 14 : Stress ratio $R = 0$

Pour l'alliage de Nickel 625 :

La contrainte maxi admissible pour 10 000 cycles à 350°C est donc $\sigma_{max} = 518 \times 2 = 1036 \text{ MPa}$

Pour les zones de soudure, prenant en compte le facteur de -20% : $\sigma_{max_soudure} = 1036 \times 0.8 = 828 \text{ MPa}$

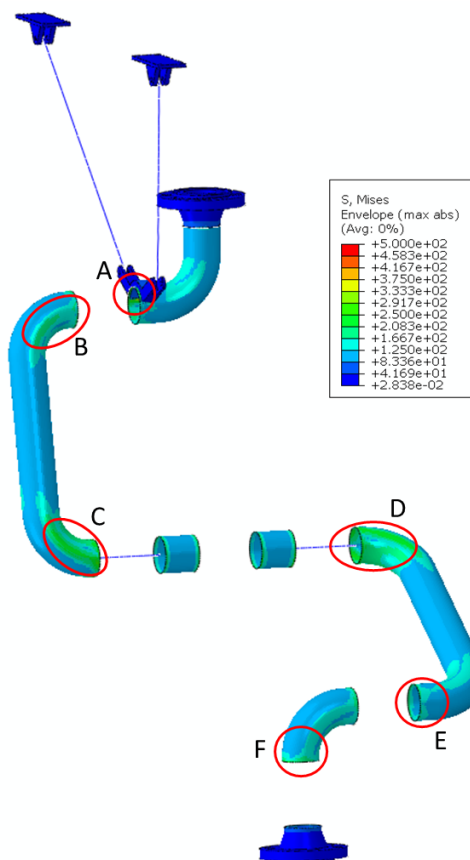
Pour l'inox AISI 321 :

La contrainte maxi admissible pour 10 000 cycles à 400°C est donc $\sigma_{max} = 198 \times 2 = 396 \text{ MPa}$

Pour les zones de soudure, prenant en compte le facteur de -20% : $\sigma_{max_soudure} = 396 \times 0.8 = 316 \text{ MPa}$

Nota : La courbe de Wöhler utilisée est tracée avec une déformation imposée (déformation totale). Pour une mesure de déformation, la contrainte équivalente σ_{eq} est calculée avec la loi de Hook : $\sigma_{eq} = E\varepsilon$. Par conséquent, les valeurs des contraintes ne prennent pas en compte la plasticité du matériau. C'est pourquoi les contraintes élastiques peuvent être directement post-traitées avec cette courbe.

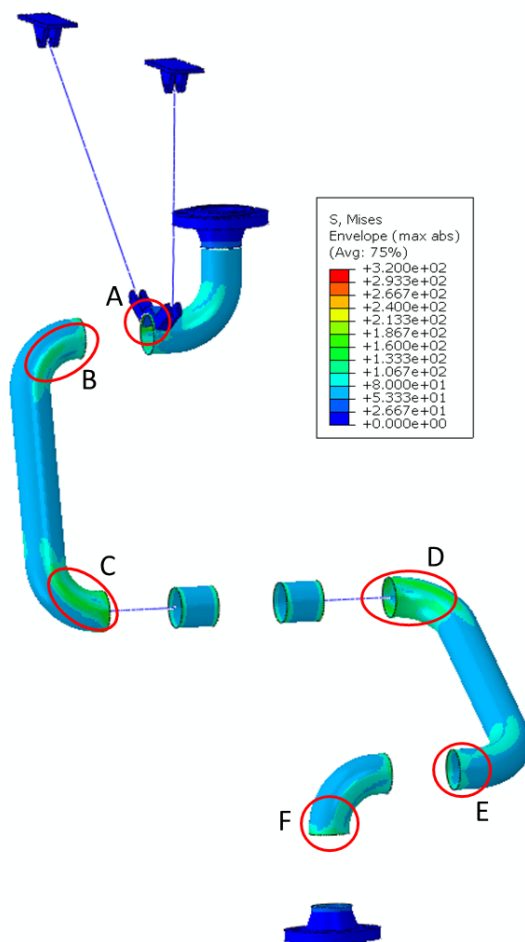
6.2.3 Résultats



Zone	Soudure	Contrainte maxi admissible	Contrainte maxi calculée	Marge*
A	Angle	828 MPa	350 MPa	136 %
B	Bout à bout	828 MPa	$205 \times 1.1 = 226 \text{ MPa}$	266 %
C	Bout à bout	828 MPa	$250 \times 1.1 = 275 \text{ MPa}$	201 %
D	Bout à bout	828 MPa	$250 \times 1.1 = 275 \text{ MPa}$	201 %
E	Bout à bout	828 MPa	$180 \times 1.1 = 198 \text{ MPa}$	318 %
F	Bout à bout	828 MPa	$225 \times 1.1 = 248 \text{ MPa}$	233 %

Tableau 7 : résultats et marges des conditions LCF pour la configuration en alliage de Nickel 625

* Marge = (contrainte maxi admissible / contrainte maxi calculée)-1



Zone	Soudure	Contrainte maxi admissible	Contrainte maxi calculée	Marge*
A	Angle	316 MPa	164 MPa	92 %
B	Bout à bout	316 MPa	$131 \times 1.1 = 144$ MPa	119 %
C	Bout à bout	316 MPa	$146 \times 1.1 = 161$ MPa	96 %
D	Bout à bout	316 MPa	$148 \times 1.1 = 163$ MPa	93 %
E	Bout à bout	316 MPa	$131 \times 1.1 = 144$ MPa	119 %
F	Bout à bout	316 MPa	$144 \times 1.1 = 159$ MPa	98 %

Tableau 8 : résultats et marges des conditions LCF pour la configuration en Inox

* Marge = (contrainte maxi admissible / contrainte maxi calculée)-1

6.3. Analyse modale

L'analyse modale de la tuyauterie mobile a été réalisée en configuration $\alpha=-3^\circ$ sur le même modèle présenté §6.2.1.

Les fréquences propres et déformées modales sont présentées ci-dessous :

Mode	Fréquence	Déformée
F1	4 Hz	Rotation des joints tournants sur Y (voir Figure 15)
F2	14 Hz	Translation sur Y du second joint tournant (voir Figure 16)
F3	20 Hz	Rotation des joints tournants sur Y (voir Figure 17)
F4	29 Hz	Rotation du joint tournant sur Z (voir Figure 18)

Tableau 9 : Premières fréquences propres de la tuyauterie mobile à $\alpha=-3^\circ$



Figure 15 : Déformée modale F1 = 4Hz

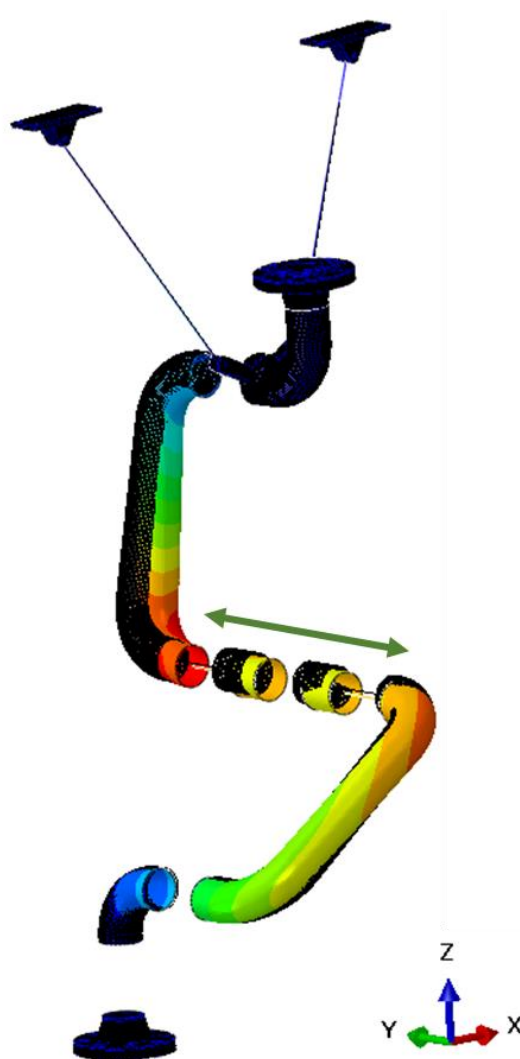


Figure 16 : Déformée modale F2 = 14Hz

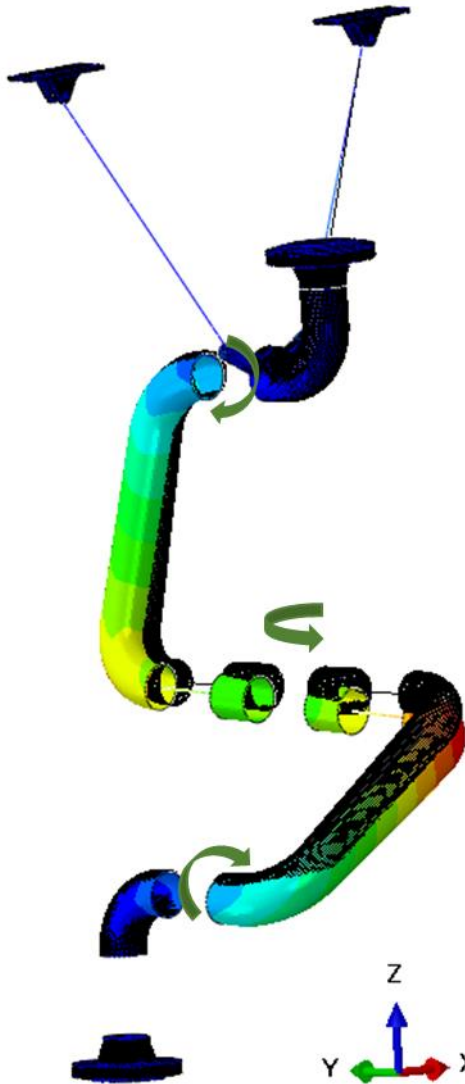


Figure 17 : Déformée modale F3 = 20 Hz

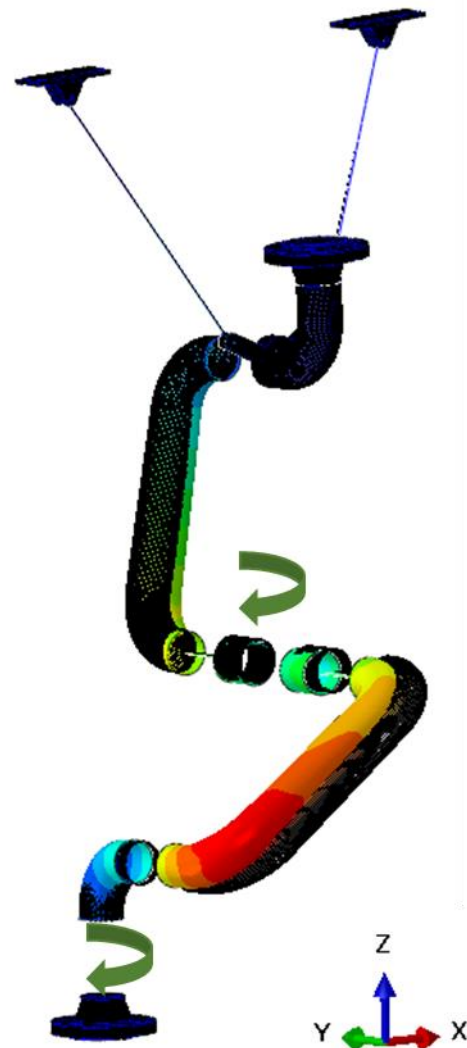


Figure 18 : Déformée modale F4 = 29 Hz

Le premier mode F1 résulte de l'activation des joints tournants horizontaux. Il peut être considéré comme un mode de déplacement de corps rigides. C'est-à-dire un mode qui correspond à des déplacements de la structure sans énergie de déformation. Par conséquent, il ne provoquera pas l'endommagement de la tuyauterie.

Le second mode F2 est un balancement sur l'axe Y de la masse non supportée de l'ensemble second joint tournant horizontal + brides. Ce mode implique de la flexion pure sur la tuyauterie provoquant son endommagement. La réduction de la masse non supportée (en supprimant tout ou partie des brides) permettrait d'augmenter la fréquence de résonance mais ne supprimerait pas ce mode endommageant. Un système de supportage/guidage de la tuyauterie bloquant la translation sur l'axe Y permettrait de bloquer ce mode et d'éviter l'endommagement. Une proposition de supportage est illustrée au paragraphe suivant (§6.4).

Le troisième mode F3 est principalement un mode d'activation des joints tournants horizontaux. Ce mode, comme le premier mode F1, peut être considéré comme un mode de déplacement de corps rigides.

Le quatrième mode F4 est un mode d'activation du joint tournant vertical.

Les fréquences de résonance suivantes sont supérieures à 60Hz.

6.4. Propositions d'améliorations

6.4.1 Amélioration du support de biellettes

La pièce de raccordement entre la tuyauterie et les biellettes de supportage sur la tuyauterie semble être une pièce usinée massive. La soudure de cette pièce sur la tuyauterie à parois fine risque d'être compliqué et de générer des déformations et contraintes résiduelles. SAO propose donc d'utiliser un système de doublantes et brackets (comme illustré Figure 19) constituées de tôles soudées d'épaisseurs proche de celle du tube. Ce système est très bien connu est éprouvé par SAO.

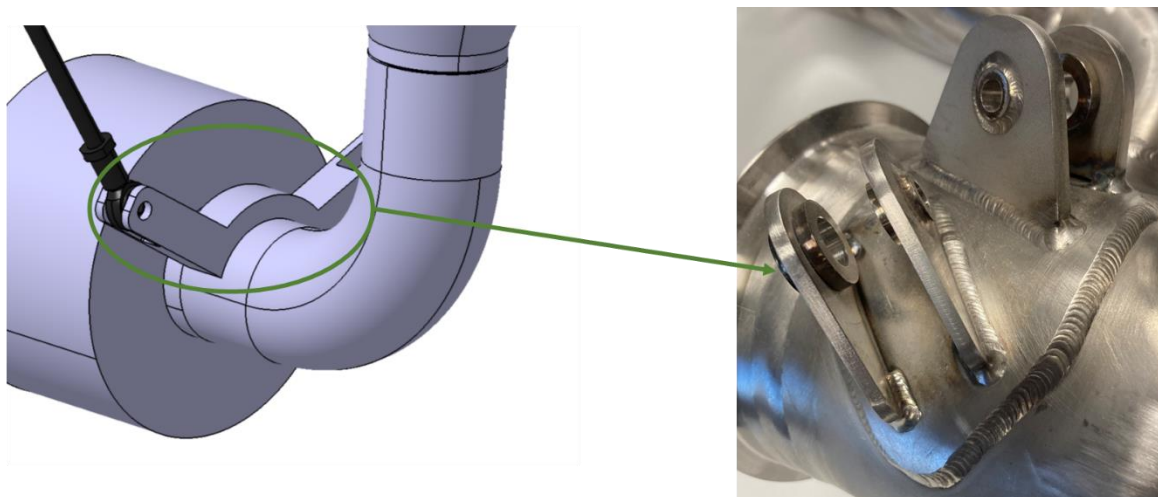


Figure 19 : Doublantes et brackets

6.4.2 Système de supportage

Pour bloquer le mode de résonance F2 et la flexion de la tuyauterie, un système de supportage sur rails de guidage suivant la cinématique de la tuyauterie suivant l'angle α est présenté Figure 20 ci-dessous.

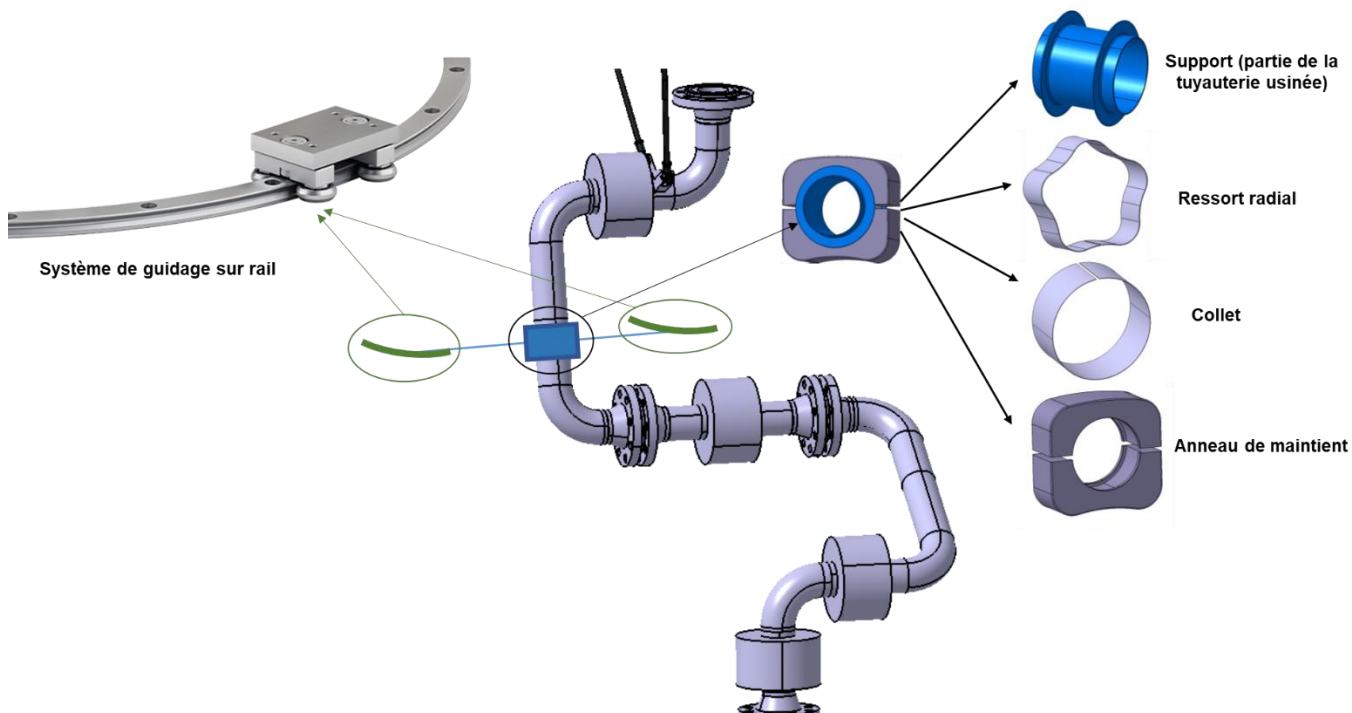


Figure 20 : Proposition de supportage

7. ETUDE DE LA TUYAUTERIE FIXE

Cette partie présente la proposition de conception et l'étude de la partie fixe de la tuyauterie HP et de son supportage. Le débattement possible en Y = [-400mm ; 400mm] est considéré dans la conception, mais seule la position Y = -100mm est considérée dans les analyses.

7.1. Proposition de conception

La tuyauterie rigide est conçue à partir de tube en alliage de Nickel 625 avec une alternative en Inox 321 selon les dimensions calculées §4.2.3. L'épaisseur d'isolation déterminée §5 est également considérée dans la conception.

Une structure rigide permettant de supporter la tuyauterie est conçue à partir d'éléments standards mécano-soudés en acier type HEA, UPN et plaque.

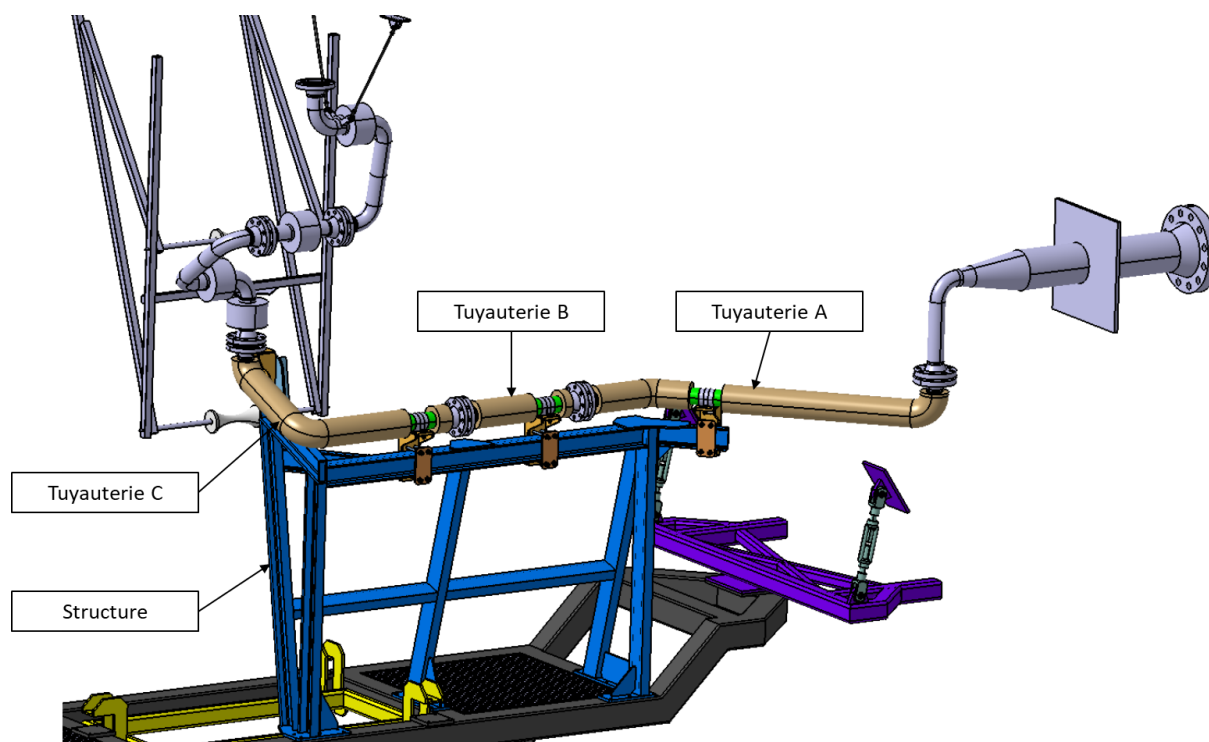


Figure 21 : vue d'ensemble de la tuyauterie rigide et de sa structure

7.1.1 Tuyauterie A

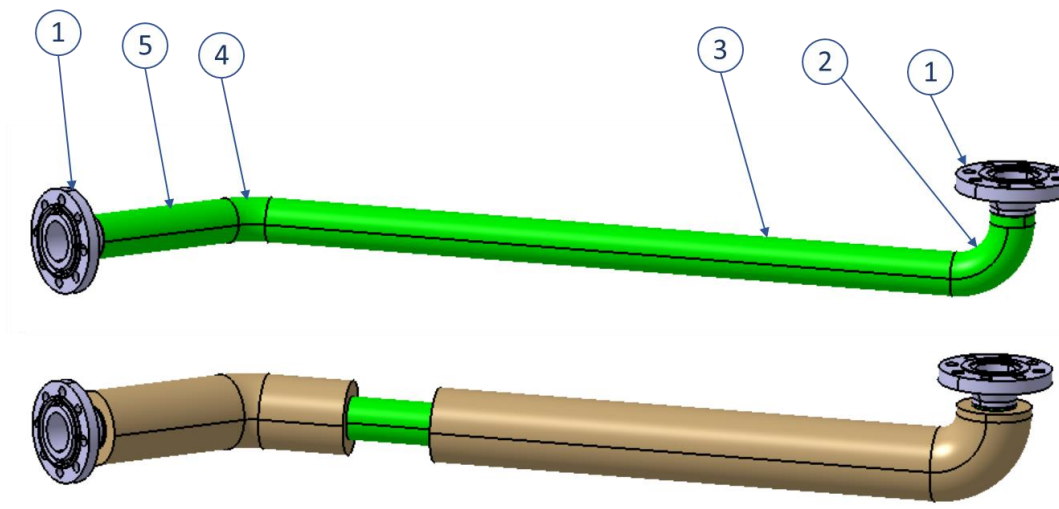


Figure 22 : Vue de la tuyauterie A

Rep.	Quantité	Désignation	Matière	Masse approximative
1	2	Bride DN80 PN100	Inox 321	9 kg
2	1	Coude Ø88.9 ep. 2mm R114mm 90°	Alliage de Nickel 625	0.9 kg
		Coude Ø88.9 ep. 3.2mm R114mm 90°	Inox 321	1.3 kg
3	1	Tube droit Ø88.9mm ep. 2mm L1392mm	Alliage de Nickel 625	6.5 kg
		Tube droit Ø88.9mm ep. 3.2mm L1392mm	Inox 321	9.5 kg
4	1	Coude Ø88.9 ep. 2mm R114mm 45°	Alliage de Nickel 625	0.4 kg
		Coude Ø88.9 ep. 3.2mm R114mm 45°	Inox 321	0.6 kg
5	1	Tube droit Ø88.9mm ep. 2mm L321mm	Alliage de Nickel 625	1.5 kg
		Tube droit Ø88.9mm ep. 3.2mm L321mm	Inox 321	2.2 kg
/	/	Isolation 25.4mm	Min-K	4.3 kg

Total configuration Alliage de Nickel 625	31.6 kg
Total configuration Inox 321	35.9 kg

Tableau 10 : Nomenclature de la tuyauterie A

7.1.2 Tuyauterie B

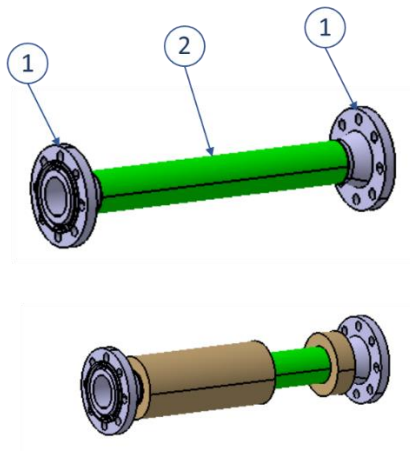


Figure 23 : Vue de la tuyauterie B

Rep.	Quantité	Désignation	Matière	Masse approximative
1	2	Bride DN80 PN100	Inox 321	9 kg
2	1	Tube droit Ø88.9mm ep.2mm L602mm	Alliage de Nickel 625	2.8 kg
		Tube droit Ø88.9mm ep. 3.2mm L602mm	Inox 321	4.1 kg
/	/	Isolation ep 25.4mm	Min-K	1 kg

Total alliage de Nickel 325	21.8 kg
Total Inox 321	23.1 kg

Tableau 11 : Nomenclature de la tuyauterie B

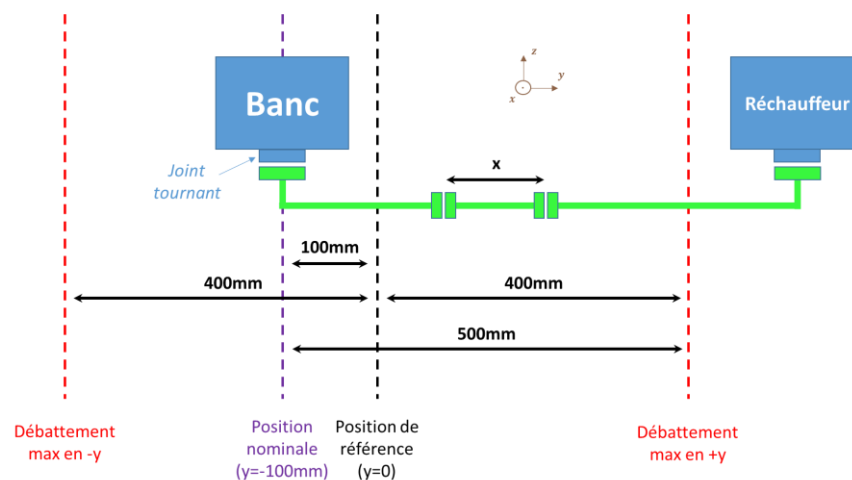


Figure 24 : schéma pour la longueur de la tuyauterie B

La longueur de cette tuyauterie B est définie pour la position $Y=-100\text{mm}$ et considère également le débattement maxi $[-400 ; 400]$. Ainsi, en position $Y=-400$ la tuyauterie B devra faire environ 1065 mm et en position $Y=400$ la tuyauterie B devra faire environ 265 mm.

7.1.3 Tuyauterie C

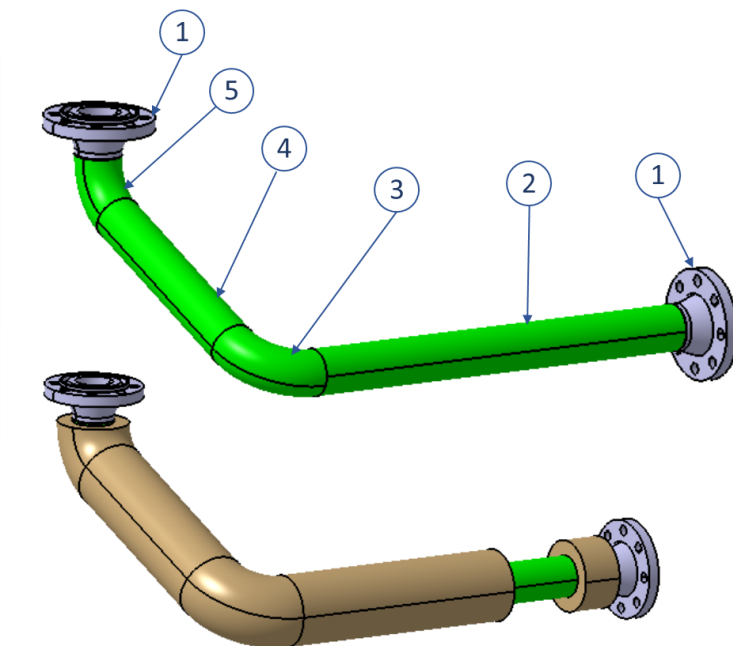


Figure 25 : Vue de la tuyauterie C

Rep.	Quantité	Désignation	Matière	Masse approximative
1	2	Bride DN80 PN100	Inox 321	9 kg
2	1	Tube droit Ø88.9mm ep. 2mm L802mm	Alliage de Nickel 625	3.7 kg
		Tube droit Ø88.9mm ep. 3.2mm L802mm	Inox 321	5.4 kg
3	1	Coude Ø88.9 ep.2mm R114mm 90°	Alliage de Nickel 625	0.9 kg
		Coude Ø88.9 ep. 3.2mm R114mm 90°	Inox 321	1.3 kg
4	1	Tube droit Ø88.9mm ep.2mm L430mm	Alliage de Nickel 625	2 kg
		Tube droit Ø88.9mm ep. 3.2mm L430mm	Inox 321	2.9 kg
5	1	Coude Ø88.9 ep.2mm R114mm 111°	Alliage de Nickel 625	0.6 kg
		Coude Ø88.9 ep. 3.2mm R114mm 111°	Inox 321	0.9 kg
/	/	Isolation 25.4mm	Min-K	3.2 kg

Total alliage de Nickel 625	28.4 kg
Total Inox 321	31.7 kg

Tableau 12 : Nomenclature de la tuyauterie C

7.1.4 Structure

La structure conçue pour supporter la tuyauterie HP est un assemblage soudé de profilés en acier de type IPE, UPN et plaque (en bleu sur la Figure 26 ci-dessous).

Sur cette structure, trois supports amovibles permettent de brider la tuyauterie fixe. Ces supports sont fixés avec un réglage possible dans les trois directions : le réglage sur les axes Y et Z se fait au blocage du support sur la structure ; le réglage sur l'axe X se fait par les perçages oblongs pour la fixation du collier Omega.

Un supportage rigide au niveau de la bride d'interface entre la partie rigide et mobile de la tuyauterie est fixé sur la structure. Ce supportage se doit d'être rigide pour que le joint tournant vertical reste dans l'axe de rotation.

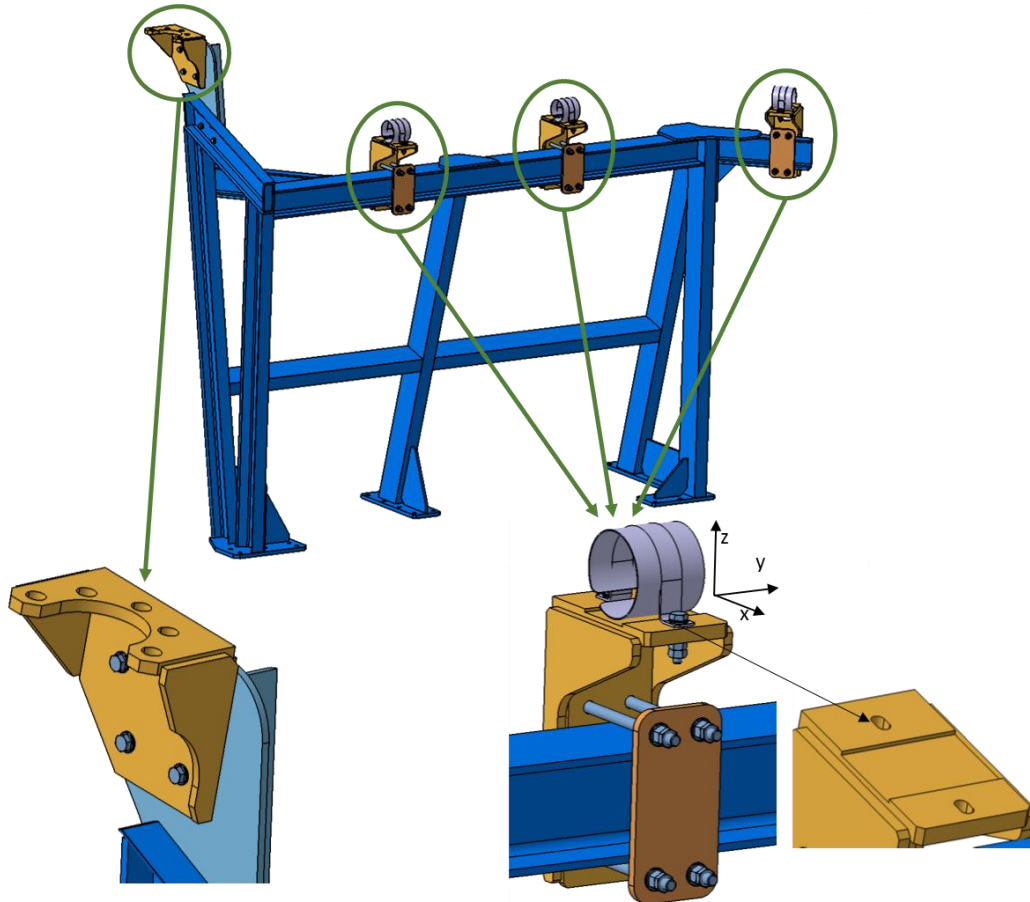


Figure 26 : vue de la structure

Pour rompre les ponts thermiques entre la tuyauterie et le supportage, il est possible d'utiliser des éléments comme ci-dessous : soit une plaque de matière isolante (type graphite ou silicate) entre le support et le collier, soit une bague en graphite autour de la tuyauterie au niveau du collier. La bague en graphite a également l'avantage de supprimer le contact métal/métal et de limiter les frottements. (voir Figure 27 & Figure 20)

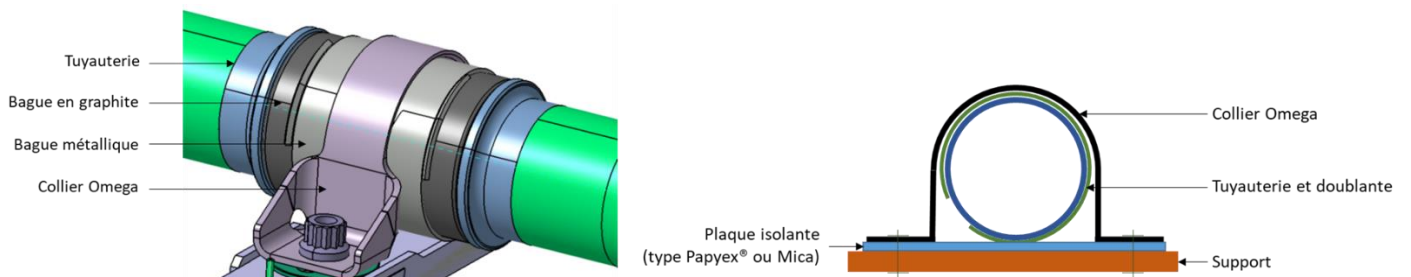


Figure 27 : Solutions de rupture de pont thermique

7.2. Etude LCF

Pour l'analyse de la tuyauterie rigide, le logiciel CAEPIPE® est utilisé. Ce logiciel permet l'analyse des contraintes pour les tuyauteries qui utilise des éléments poutres considérant une pression interne. La formulation de CAEPIPE® est basée sur les règles du CODAP et du CODETI et est complètement conforme avec ces deux codes.

Les contraintes et formulations utilisées par le logiciel sont détaillées dans le rapport [4] DTE 090 2017 §4.

7.2.1 Données d'entrée et Contraintes admissibles

Les contraintes admissibles utilisées pour l'alliage de Nickel 625 et l'inox AISI321 sont les mêmes que présentées §4.2.2.

Matériau	Température T	Densité ρ	Coefficient de Poisson ν	Module d'Young E	Coefficient de dilatation thermique α	Contrainte admissible f
Alliage de Nickel 625	20°C	8442 kg/m ³	0.28	205 463 MPa	12.9 E ⁻⁶ °C ⁻¹	248 MPa
	377°C		0.28	172 589 MPa	13.5 E ⁻⁶ °C ⁻¹	175 MPa
Inox 321	20°C	7850 kg/m ³	0.3	199 948 MPa	15.5 E ⁻⁶ °C ⁻¹	140 MPa
	377°C		0.3	175 954 MPa	18.0 E ⁻⁶ °C ⁻¹	94 MPa

*Tableau 13 : Propriétés mécanique de l'alliage de Nickel 625 et de l'inox AISI 321 issues du MMPDS [6]
implémentées dans le modèle*

7.2.2 Présentation du modèle

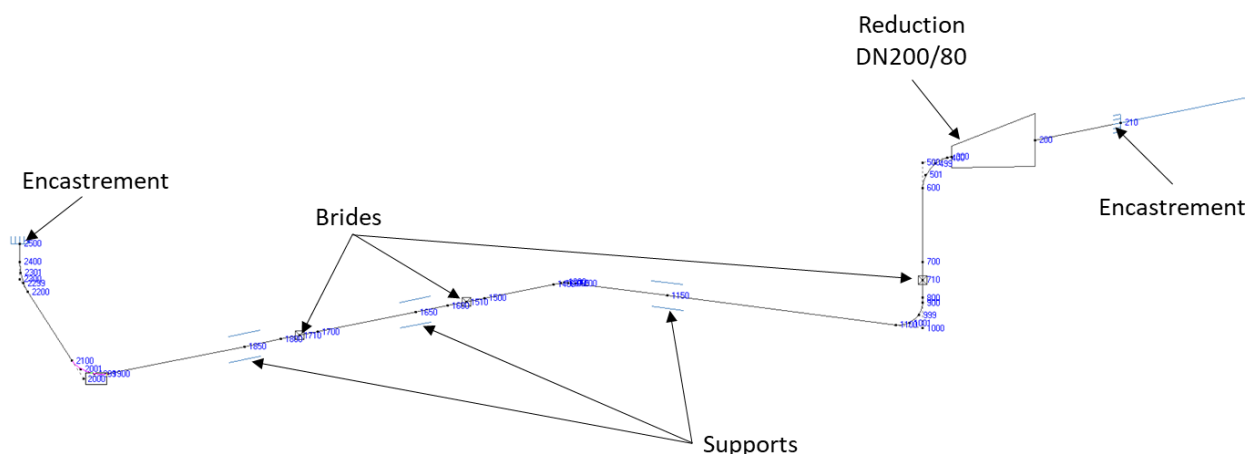


Figure 28 : vue du modèle CAEPIPE®

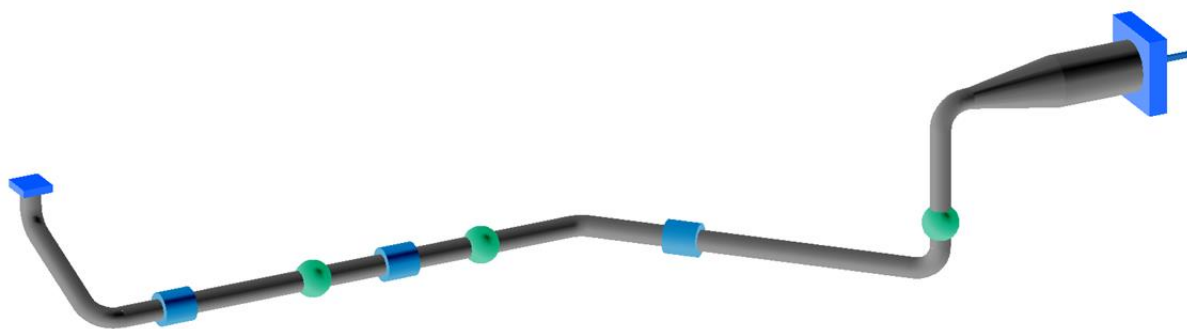


Figure 29 : Vue avec rendu du modèle CAEPIPE®

Les brides aux extrémités de la tuyauterie sont considérées encastrées, c'est-à-dire que tous les degrés de liberté sont bloqués.

Des guides sont utilisés pour simuler les trois points de supportage. Ces guides permettent la translation avec un coefficient de frottement fixé à 0.5 et la rotation suivant l'axe de la tuyauterie.

Les brides prises en compte dans le modèle est sont modélisées par des masses ponctuelles. Une masse de 9kg est considérée pour les brides DN80, tandis que les brides DN200 n'ont pas de masse considérée puisque considérées encastrées dans la simulation.

L'épaisseur de 25.4mm d'isolation est bien considéré dans ce modèle.

7.2.3 Résultats

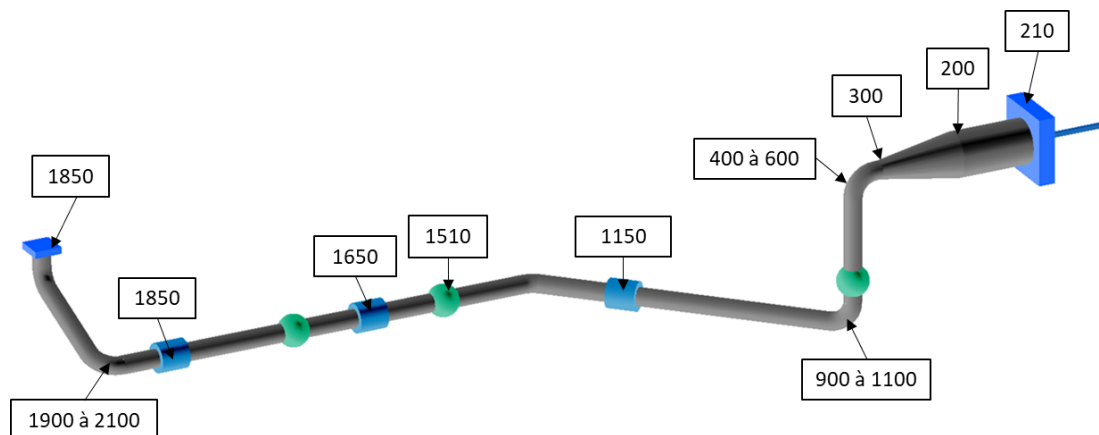


Figure 30 : Nœuds du modèle CAEPIPE®

7.2.3.1 Contraintes

Pression et gravité			Dilatation thermique		
Nœud	Contrainte SL (MPa)	SL / SH	Nœud	Contrainte SE (MPa)	SE / SA
210	78,3	0,45	1001	299	0,63
200	77,1	0,44	1000B	290	0,61
500A	59,4	0,34	999	274	0,58
500B	58,6	0,33	1999	261	0,55
1650	58	0,33	501	255	0,54
501	57,8	0,33	2001	254	0,54
1150	57,7	0,33	500B	242	0,51
300	57,5	0,33	499	237	0,5
1850	57,3	0,33	2000A	225	0,47
400	57	0,33	1000A	224	0,47

Tableau 14 : Contraintes maxi et marges pour la configuration alliage de Nickel 625

Pour rappel : SH = Contrainte mécanique primaire admissible
SA = Contrainte thermique secondaire admissible

Pression et gravité			Dilatation thermique		
Nœud	Contrainte (MPa)	Marge	Nœud	Contrainte (MPa)	Marge
200	77,2	0,82	1001	387	0,82
300	57,6	0,61	1000B	374	0,79
210	44,9	0,48	999	355	0,75
1150	36,4	0,39	300	174	0,74
1650	36,3	0,39	501	326	0,69
1850	36,2	0,39	1999	327	0,69
400	35,7	0,38	2001	325	0,69
600	35,7	0,38	500B	315	0,67
1510	35,7	0,38	1850	162	0,63
1500	35,6	0,38	499	297	0,63

Tableau 15 : Contraintes maxi et marges pour la configuration Inox 321

7.2.3.2 Efforts et moments

Les efforts et moments aux interfaces dans le repère global considérant la pression, température et gravité sont présentés ci-dessous :

Nœud	Conditions	FX(N)	FY(N)	FZ(N)	MX(Nm)	MY(Nm)	MZ(Nm)
210	Encastrement	2715	2303	1307	-450	-1130	2197
1150	Guide	-2165	-3253	-2859	N/A	N/A	N/A
1650	Guide	-918	-4287	2150	N/A	N/A	N/A
1850	Guide	3186	5343	-3474	N/A	N/A	N/A
2500	Encastrement	-3002	-3865	1773	-761	257	-1232

Tableau 16 : Efforts et moments dans le repère global pour la configuration alliage de Nickel 625

Nœud	Conditions	FX(N)	FY(N)	FZ(N)	MX(Nm)	MY(Nm)	MZ(Nm)
210	Encastrement	3594	2951	1931	-849	-1532	2844
1150	Guide	-3082	-4506	-4207	N/A	N/A	N/A
1650	Guide	-1696	-6384	3745	N/A	N/A	N/A
1850	Guide	4950	8323	-5362	N/A	N/A	N/A
2500	Encastrement	-4526	-5062	2651	-958	417	-1656

Tableau 17 : Efforts et moments dans le repère global pour la configuration Inox 321

7.2.3.3 Analyse modale

Les premières fréquences de résonance de la tuyauterie fixe sont présentées ci-dessous :

Numéro du mode	Fréquence en configuration alliage de Nickel 625	Fréquence en configuration Inox 321
F1	23 Hz	24 Hz
F2	56 Hz	61 Hz
F3	65 Hz	69 Hz
F4	70 Hz	76 Hz
F5	92 Hz	106 Hz

Tableau 18 : Premières fréquences de résonance de la tuyauterie fixe

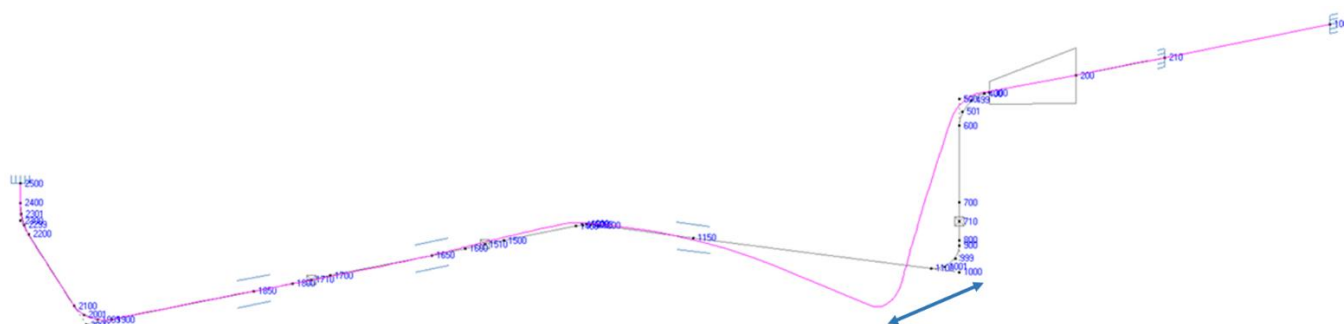


Figure 31 : Fréquence de résonance F1

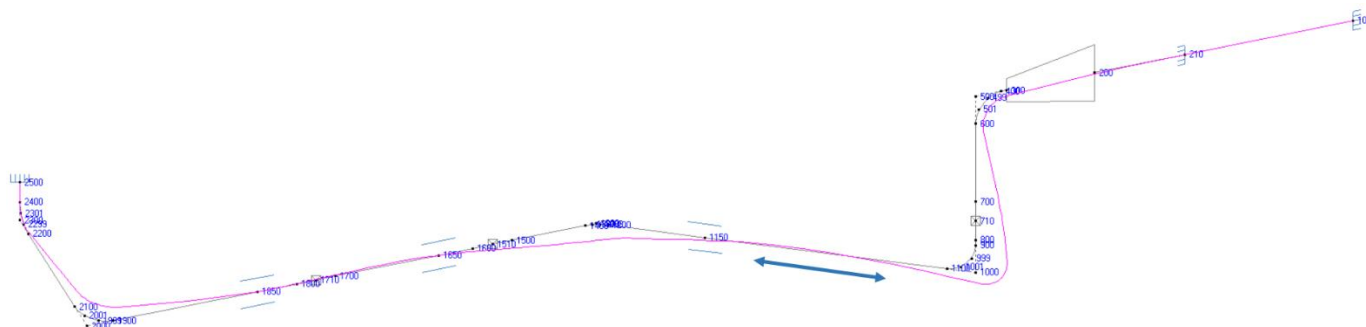


Figure 32 : Fréquence de résonance F2

Réf: RAPPORT DE CALCULS - DTE 121 2024 Rev. A

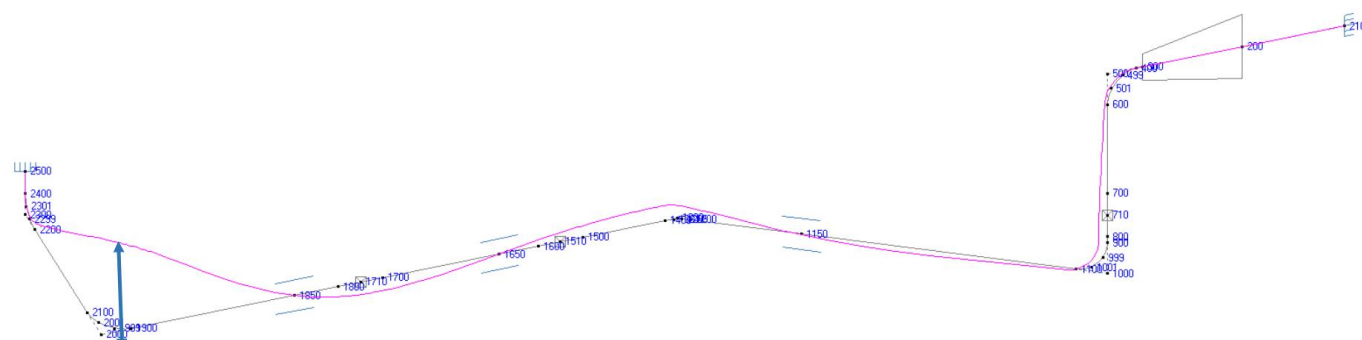


Figure 33 : Fréquence de résonance F3

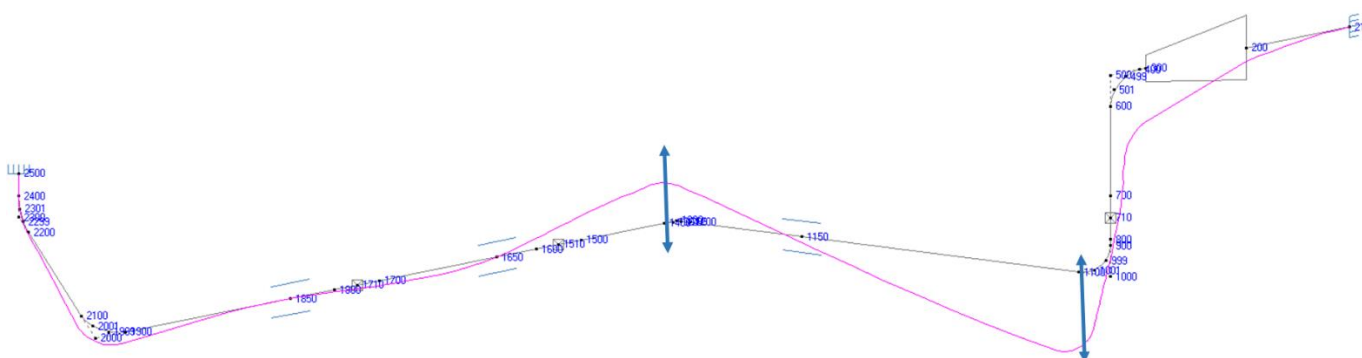


Figure 34 : Fréquence de résonance F4

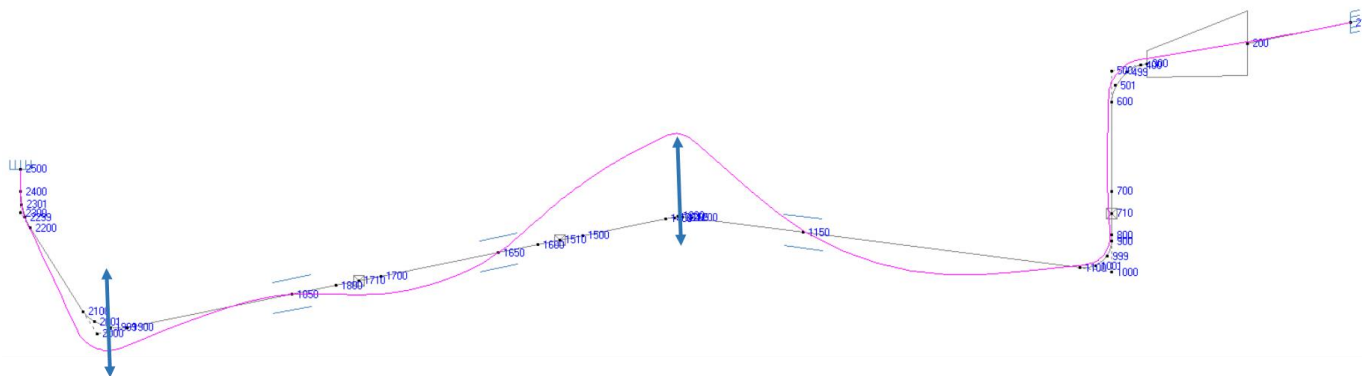


Figure 35 : Fréquence de résonance F5

8. CALCUL DES PERTES DE CHARGE

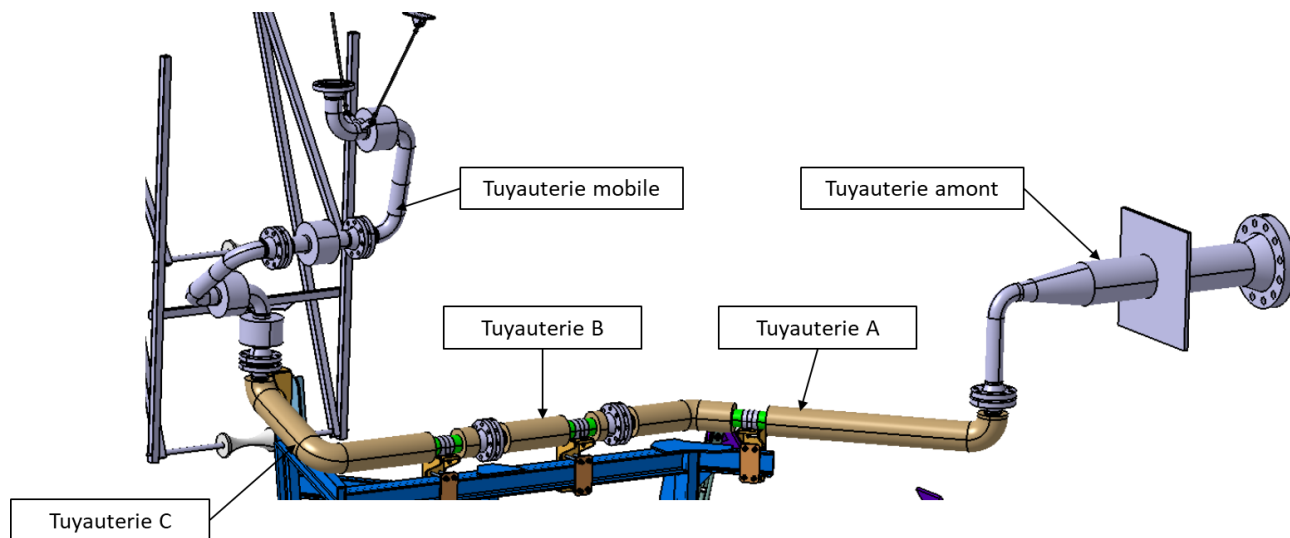


Figure 36 : Tuyauteries HP

Le logiciel interne (EvalΔH) basé sur les données de "I.E. Idel'cik – memento des pertes de charge" a été utilisé pour calculer les pertes de charge. Les brides et joints tournants ont été considérés comme des parties droites dans ce calcul.

Les conditions de fonctionnement issues de [1] et présenté Tableau 19 : données considérées pour le calcul des pertes de charge sont utilisées pour le calcul des pertes de charge.

Paramètres	Valeur	Unité
Température	377	°C
Débit	17.2	kg/s
Pression	50	bar

Tableau 19 : données considérées pour le calcul des pertes de charge

Tuyauterie	Zone	Perte de charge
Tuyauterie amont	Partie droite DN200	2.31 mbar
	Partie droite DN80	88.97 mbar
	Réduction DN200/DN80	270.98 mbar
	Coude	343.16 mbar

Total	705.42 mbar
-------	-------------

Tableau 20 : Calcul des pertes de charge de la tuyauterie amont

Tuyauterie	Zone	Perte de charge
Tuyauterie A	Partie droite DN80	309.92 mbar
	Coudes	557.32 mbar

Total	867.24 mbar
-------	-------------

Tableau 21 : Calcul des pertes de charge de la tuyauterie A

Tuyauterie	Zone	Perte de charge
Tuyauterie B	Partie droite DN80	132.23 mbar

Total	132.23 mbar
-------	-------------

Tableau 22 : Calcul des pertes de charge de la tuyauterie B

Tuyauterie	Zone	Perte de charge
Tuyauterie C	Partie droite DN80	226.86 mbar
	Coudes	628.79 mbar

Total	855.65 mbar
-------	-------------

Tableau 23 : Calcul des pertes de charge de la tuyauterie C

Tuyauterie	Zone	Perte de charge
Tuyauterie mobile	Partie droite DN80	410.32 mbar
	Coudes	2058.78 mbar

Total	2469.1 mbar
-------	-------------

Tableau 24 : Calcul des pertes de charge de la tuyauterie mobile

9. CONCLUSION

L'analyse cinématique de la tuyauterie mobile n'a montrée aucun point bloquant quel que soit les positions possibles des angles α et β .

En conditions LCF, deux configurations possibles répondent aux exigences de tenue à la température et à la pression : une configuration en alliage de Nickel 625 et une configuration en Inox AISI 321. La configuration en Inox 321 présente toutefois des marges inférieures et des épaisseurs supérieures à la configuration en alliage de Nickel 625.

L'analyse modale de la tuyauterie rigide présente une première fréquence de résonance supérieure à 20 Hz. En revanche, les premières fréquences de résonance de la tuyauterie mobile sont inférieures à 20 hZ et présente un risque d'endommagement de la tuyauterie. Une proposition de supportage est présentée §6.4 pour pallier cet endommagement.

10. ANNEXES

10.1. Extraits de la norme NF EN 10253-4

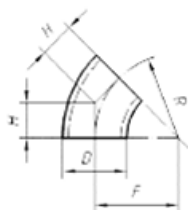


Figure 1 — Coude à 45°

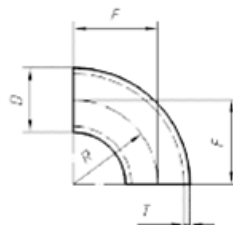


Figure 2 — Coude à 90°

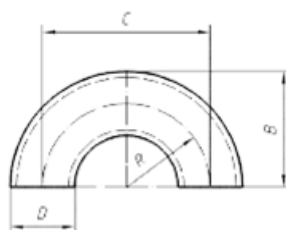


Figure 3 — Coude à 180°

Dimensions spécifiques de raccords

Les dimensions spécifiques des raccords dont la liste est donnée dans les Tableaux A.1, A.2, A.5 et A.7 sont basées sur l'ISO 5251 et l'ISO 3419.

Tableau A.1 — Dimensions spécifiques des coudes répertoriés avec rayon de courbure 2D, 3D et 5D

DN	D mm	2D			3D			5D
		F mm	C mm	B mm	F mm	C mm	B mm	F mm
15	21,3	25	50	36	28	56	38	45
20	26,9	25	50	39	29	58	43	57
25	33,7	28	56	42	38	76	55	72
32	42,4	32	64	53	48	96	69	93
40	48,3	38	76	62	57	114	81	108
50	60,3	51	102	81	76	152	106	135
65	76,1	63	127	102	95	190	133	175
80	88,9	76	152	121	114	228	159	205
100	114,3	102	203	159	152	304	209	270
125	139,7	127	254	197	190	380	260	330
150	168,3	152	305	237	229	458	313	390
200	219,1	203	406	313	305	610	414	510
250	273,0	254	508	391	381	762	518	650
300	323,9	305	610	467	457	914	619	775
350	355,6	356	711	533	533	1066	711	850
400	406,4	406	813	610	610	1220	813	970
450	457,0	457	914	686	686	1372	914	1122
500	508,0	508	1016	762	762	1524	1016	1245
600	610,0	610	1220	914	914	1828	1219	1524
700	711,0	711	1422	1066	1067	2134	1422	1778
800	813,0	813	1626	1220	1219	2438	1625	2033
900	914,0	914	1828	1371	1372	2744	1829	2285
1000	1016,0	1016	2032	1524	1524	3048	2032	2540

Réf: RAPPORT DE CALCULS - DTE 121 2024 Rev. A

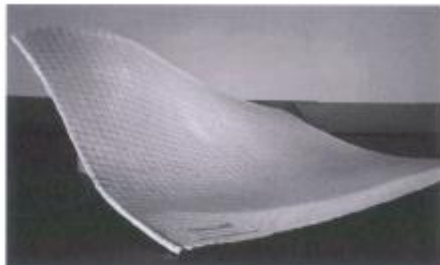
Tableau A.6 — Dimensions spécifiques des réductions concentriques et excentriques, listées

DN	D mm	DN_1	D_1 mm	L mm	DN	D mm	DN_1	D_1 mm	L mm
15	21,3	10	17,2	12	350	355,6	300	323,9	94
20	26,9	15	21,3	17			250	273	244
		10	17,2	29			200	219,1	404
25	33,7	20	26,9	20	400	406,4	150	168,3	554
		15	21,3	37			350	355,6	150
32	42,4	25	33,7	26			300	323,9	244
		20	26,9	46	450	457	250	273	395
40	48,3	32	42,4	17			200	219,1	554
		25	33,7	43			400	406,4	150
		20	26,9	63	500	508	350	355,6	301
50	60,3	40	48,3	36			300	323,9	395
		32	42,4	53			250	273	545
		25	33,7	79	600	610	450	457	150
65	76,1	20	26,9	99			400	406,4	301
		50	60,3	47			350	355,6	451
		40	48,3	82	700	711	300	323,9	545
80	88,9	32	42,4	100			500	508	301
		25	33,7	126			450	457	451
		65	76,1	38	800	813	400	406,4	601
100	114,3	50	60,3	85			350	355,6	752
		40	48,3	120			600	610	301
		32	42,4	138	900	914	500	508	601
125	139,7	80	88,9	75			450	457	752
		65	76,1	113			400	406,4	902
		50	60,3	160	1000	1016	700	711	301
150	168,3	40	48,3	195			600	610	601
		100	114,3	75			500	508	902
		80	88,9	151	1100	1120	450	457	1053
200	219,1	65	76,1	188			800	813	301
		50	60,3	235			700	711	601
		125	139,7	85	1200	1220	600	610	902
250	273	100	114,3	160			500	508	1203
		80	88,9	235			900	914	301
		65	76,1	273	1200	1220	800	813	601
300	323,9	150	168,3	150			700	711	902
		125	139,7	235			600	610	1203
		100	114,3	310	1200	1220	1000	1016	308
350	355,6	80	88,9	385			900	914	609
		200	219,1	160			800	813	909
		150	168,3	310	1200	1220	700	711	1210
400	406,4	125	139,7	395			1100	1120	296
		100	114,3	470			1000	1016	604
		250	273	151			900	914	905
450	457	200	219,1	310			800	813	1205
		150	168,3	461					
		125	139,7	545					

10.2. Fiche Technique du Min-K®



Flexible Min-K® F-351 and F-382 Product Information



Product Overview

The next generations of Thermal Ceramics aerospace insulations, F-351 and F-382 are now available for use as the new standards for many aerospace applications. These materials are designed to meet the aerospace industry's continuing push for lightweight, durable, high-performance insulation. Similar to the traditional Min-K product offering, the improved core materials are available in multiple cloth facings, densities and thicknesses.

Performance

Flexible Min-K uses an optimized blend of best-in-class raw materials to produce a uniquely low thermal conductivity. The particles and fibers create a sub-micron pore structure which limits the convection of air, the conduction of heat, and the transmission of radiation. Min-K materials are engineered to provide optimum thermal efficiency while maintaining cost and physical properties. Thermal conductivity of F-351 is optimized for use in higher temperature applications. F-382 is a premium core product designed for superior thermal conductivity across the temperature use range..

Considerations

Fumed silica based microporous insulations are sensitive to liquids due to the nature of their ingredients. Exposure to water, oils, etc will degrade the microporous structure. Care should be exercised in handling to prevent contact with liquids. Hydrophobic grade mixes are also available.

Features

- Lowest thermal conductivity
- Lightweight
- Durable
- Non-Combustible
- No Flame Spread
- Use limit of 1832°F (1000°C)
- Multiple cloth facing options

Physical Characteristics

Temperature Use Limit, °F (°C)	1832 (1000)
Core formula	F-351, F-382
Cloth facings	E-Glass, S-Glass, Quartz, Nextel™
Cloth/Thread Maximum Temperature Use Limits, °F (°C)	
E-Glass	500 (260)
S-Glass	1200 (649)
Quartz	1958 (1070)
Nextel	2200-2500 (1204-1371)
Thread	E-Glass, Quartz
Density, pcf (kg/m³)	8, 10, 16 (128, 160, 256)

Availability, Standard

Thickness, in (cm)	1/8, 1/4, 3/16, 3/8, 1/2 (0.318, 0.635, 0.476, 0.953, 1.27)
Dimensional Size, in (cm)	36x36, 36x48 (91x91, 91x122) square stitched on 1" (2.54 cm) centers

Tolerances, Standard

Thickness, in (cm)	+0.060 / -0.030 (+0.152 / -0.08)
Length and Width in (cm)	+2.0 / -0.0 (+5.08 / -0.0)

Flexible Min-K F-351 and F-382

Product Information

Thermal Conductivity, BTU-in/hr-ft²-°F (W/m-K) ASTM C201

mean temperature, 16 pcf core without facing

	F-150	F-182	F-351	F-382
212°F (100°C)	0.131 (0.019)	0.145 (0.021)	0.129 (0.019)	0.097 (0.014)
392°F (200°C)	0.136 (0.020)	0.145 (0.021)	0.129 (0.019)	0.094 (0.014)
572°F (300°C)	0.148 (0.021)	0.150 (0.022)	0.129 (0.019)	0.097 (0.014)
752°F (400°C)	0.168 (0.024)	0.161 (0.023)	0.134 (0.019)	0.106 (0.015)
932°F (500°C)	0.195 (0.028)	0.177 (0.026)	0.145 (0.021)	0.121 (0.017)
1112°F (600°C)	0.229 (0.033)	0.199 (0.029)	0.162 (0.023)	0.142 (0.020)
1292°F (700°C)	-	0.226 (0.033)	0.184 (0.026)	0.169 (0.024)
1472°F (800°C)	-	0.258 (0.0372)	0.211 (0.030)	0.202 (0.029)

