

MATERIAU TRANSPARENT

1 Choix du matériau

Cette étape est particulièrement cruciale. Nous rêvons tous d'avoir un fourreau totalement transparent, qui puisse supporter les pressions de l'ordre de 500 bars et les températures de l'ordre de 300°C. Plusieurs types de matériaux peuvent répondre à nos attentes au niveau de la transparence et de la résistance. Le tableau 5 représente les propriétés des différents types de verres et céramiques transparentes existants.

Le plus résistant dans l'univers, que tout le monde connaît, est le diamant. Mais trouver un diamant de la taille d'un fourreau pour une presse industrielle, ou même pour une épaisseur de 40 mm est impossible. Il existe aussi des diamants de synthèse. Par contre, la transparence des diamants de synthèse, ainsi que leurs propriétés mécaniques ne correspondent pas à nos attentes.

Un autre matériau qui vient à l'esprit est le saphir. Excellent module élastique, et ayant des propriétés optiques intéressantes, ce matériaux est apte à notre exigence dans nos choix de verre. Mais exactement comme le diamant, le prix du saphir est trop élevé. L'usinage de saphir n'est pas facile non plus, surtout si il s'agit de tailler un cylindre du diamètre de la vis avec une précision très importante. Cette tolérance permet que la vis puisse passer dans l'ensemble du système sans toucher (donc abimer) les pièces en verre en maintenant la pression imposée par la vis.

Le quartz est un matériau très courant, couramment évoqué dans les différents projets de fourreaux transparents pour extrusion ou de fenêtres transparentes pour les moules d'injection, systèmes dans lesquels la pression et la température ne sont pas très importantes contrairement au cas d'une presse à injecter (11, 17, 18). Dans ces deux cas, la pression n'est pas très importante, le besoin est limité à un matériau avec une résistance moyenne mais une bonne propriété optique. Dans ce cas, le quartz est donc le meilleur choix. Dans notre projet, les propriétés mécaniques de ce matériau ne correspondent pas à notre cahier des charges.

Après plusieurs recherches et vérifications, nous trouvons au final la matière BK7[®]. Le BK7[®] est un verre borosilicate, contenant environ 80% d'oxyde de silicium (SiO₂), 12,5 % d'oxyde de bore (B₂O₃), 5% d'oxyde de sodium (Na₂O), 2 % d'oxyde d'aluminium (Al₂O₃). Le BK7[®] est un type de verre déposé par Schott©, très connu pour sa capacité de transmission (une transmission linéaire dans le domaine visible jusqu'à 350nm) (Cf. Figure 15) [20], et son apparence claire et nette. Étant un matériau pur et doté de très bonnes propriétés optiques, il est la matière la plus utilisée pour de nombreuses applications optiques, comme par exemple : des verres à lentilles, des verres dans les domaines de mesure et des capteurs haute-technologie, etc.

En plus, d'une part cette matière a des très bonnes propriétés mécaniques : un module de Young (module élastique) important, de 82 GPa, bonne résistance en traction 69 MPa, et dix fois plus en compression 690 MPa ; d'autre part elle a une excellente tenue en température, sa température de transformation est de 557 °C et le point de fusion est de 719 °C. Le matériau conserve totalement ses propriétés jusqu'à 300 °C. En poursuivant dans nos recherches d'informations sur le BK7[®], nous trouvons que c'est le seul type de verre qui, sous l'effet de

la chaleur, augmente sa résistance élastique (Cf. Figure 16). Le module de Young augmente linéairement de 25 °C à 400°C d'après les études de YURITSYN N. S [19].

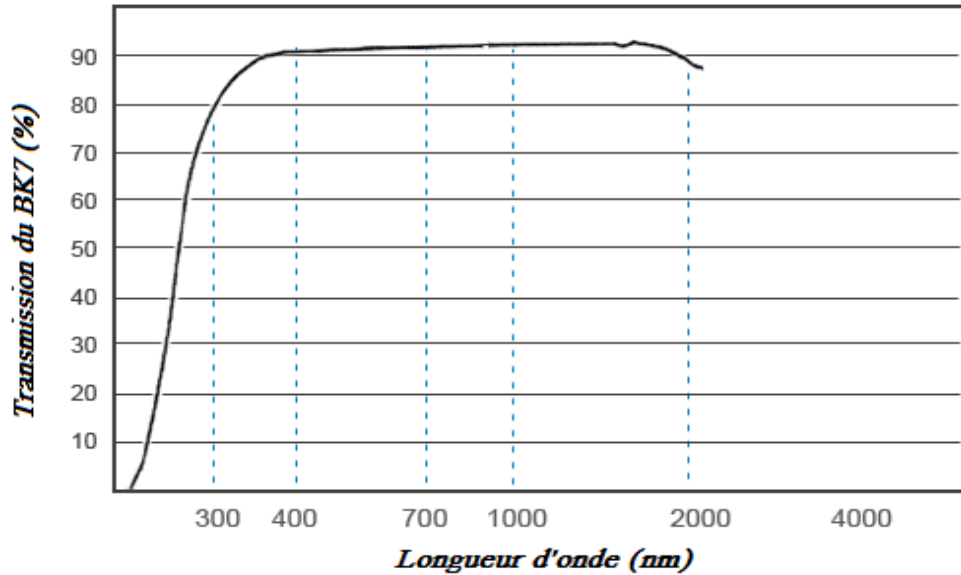


Figure 15: Courbe de transmission du verre BK7[®] en fonction de la longueur d'onde (Schott)

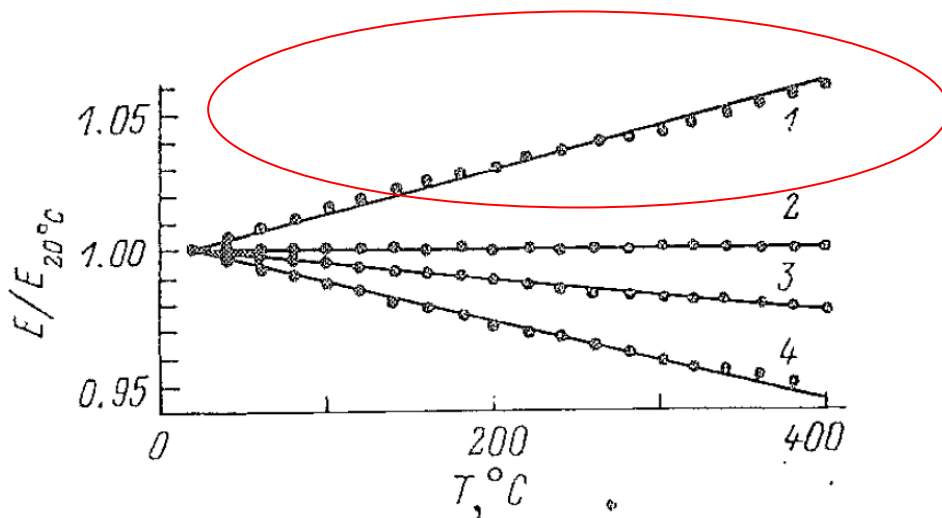


Figure 16: Rapport de module de Young ($E/E_{20^{\circ}\text{C}}$) en fonction de la température – d'après YURITSYN N. S., "Variations thermiques du module d'Young des verres de borosilicates de sodium de même teneur en Na_2O et B_2O_3 ", 1988, vol. 14, N°6, pp. 867-873, Nauka, Leningradskoe otdelenie, Leningrad, RUSSIE, ISSN 0132-6651

		Unité	Diamant	Saphir	Quartz (silice fondue)	Quartz IR	Silicium	Verre BK7
Propriétés thermique	Coefficient de dilatation	1/°C	1,18E-06	5,30E-07	5,50E-07	5,50E-07	2,60E-07	5,50E-07
	Température maximum	°C		2000	1713	1300	1412	557
	Conductivité thermique	W/cm.°C					1,3	
	Chaleur spécifique	J/g.°C		0,75	0,67	0,356	0,7	0,858
Propriétés mécaniques	Module d'Young	MPa	1,00E+06	7,20E+05	7,20E+04	7,30E+04	1,31E+05	8,20E+04
	Module de Shear	MPa		400		3,10E+04	5,20E+04	
	Dureté knoop	MPa		1,90E+05				
	Résistance à traction	MPa	7000	190				
	Constante de Poisson			0,3	0,17	0,17	0,28	0,28
Propriétés optiques	Transmission	Nm		de 200 à 2000 nm	de 200 à 2000 nm		de 25 à 300 µm	de 300 à 2000nm
	Indice de réfraction		2,426 à 527nm	1,46 à 500 nm	1,46 à 500 nm		3,43 à 4µm	1,5

Tableau 5: Propriétés des différents types de verres existés

Source [20] : <http://www.bullier.biz/composants-optiques-pour-l-uv-le-visible-et-l-ir-eot-cPath24.html>

Le BK7[®] est produit dans des bandes et des blocs de 350 mm de largeur et d'environ 70 mm d'épaisseur, ce qui correspond bien à notre besoin, car pour que notre fenêtre en verre puisse supporter la pression dans le système vis-fourreau, elle devrait avoir une épaisseur assez importante (au minimum l'épaisseur du fourreau classique – 30 mm). Il peut aussi être fabriqué à toutes les tailles, notamment de plus petites tailles pour des applications scientifiques et technologiques. D'après les fournisseurs de verre spécifique [21], le BK7[®] est aussi disponible sur demande en plus grandes dimensions. De plus, ce matériau est extrêmement stable chimiquement, donc aucun traitement spécial n'est nécessaire pour meuler et pour polir le matériau.

Toutes ces raisons réunies font que nous fixons notre choix sur cette matière pour nos fenêtres en verre : le verre BK7[®].

Propriétés Mécaniques	
Densité	2,51 g/cm ³
Module de Young's	82 GPa
Dureté Knoop	610
Coefficient de Poisson	0,206
Résistance en traction	69 MPa
Résistance en compression	690 MPa
Résistance en flexion	80 MPa
Propriétés thermiques	
Coefficient de dilatation	70e-7 (1/°C) (0-300°C)
Température de transformation	557 °C
Température de fusion	719 °C
Propriétés optiques	
Indice de réfraction	1,509
Transmission	de 300 nm à 2000 nm
Propriétés chimiques	
Résistance à l'eau	classe 2
Résistance à l'acide	classe 1
Résistance aux alcanes	classe 1

Tableau 6: Principales propriétés du verre BK7[®]

2 Choix de forme : conception et simulation

Pour dessiner et valider la forme de notre fenêtre en verre, nous travaillons principalement avec deux logiciels : CATIA et ANSYS

CATIA (Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée) – V5R19 :

C'est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO), créé par Dassault Système. Ce logiciel permet de dessiner, concevoir et améliorer les pièces en trois dimensions.

ANSYS et ANSYS Workbench :

ANSYS est un éditeur de logiciels de simulation numérique et de codes calcul de structure par éléments finis. ANSYS propose plusieurs produits différents, et depuis quelques années, pour nos études à l'INSA de Lyon, nous disposons d'ANSYS Workbench. Ce dernier nous permet de faire des analyses, en interfaçant les modules de CAO, maillage, calcul et exploitation des résultats.

Les étapes de simulation :

- Création de pièce dans CATIA, puis transfert sur ANSYS
- Maillage (mailler la pièce en plusieurs nœuds ou bien créations des éléments sur la pièce – calcul éléments finis)
- Mise en données : imposer le matériau pour chaque pièce, imposer les conditions de contact entre chaque pièce (dans le cas où on simule un assemblage), et imposer des conditions limites (pressions, fixations, etc.)
- Lancement de calcul

Les résultats calculés par ANSYS sont

- 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème} contrainte principale
- Contrainte équivalente ou contrainte de Mohr-Coulomb
- 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème} déformation principale
- Déformation équivalente ou déformation
- Outils de sécurité :
 - ✓ Coefficient de sécurité
 - ✓ Marge de sécurité

Nous pouvons aussi créer des pièces en 3D sous l'interface d'ANSYS Workbench, mais comme nous avons appris à utiliser CATIA pour la création des objets, nous pensons donc à l'utiliser pour dessiner nos pièces, ensuite faire des calculs sous ANSYS. La limitation du logiciel ANSYS, version éducation est de 32000 nœuds dans le maillage.

Dans toutes les simulations suivantes, nous imposons sur nos pièces ou notre assemblage de fourreau des conditions limite:

- Le fourreau doit être fixé sur la presse
- La pression appliquée sur le cylindre est de 500 bars
- La température de travail est de 300°C (température de travail pour l'injection du poly carbonate)

Les conditions aux limites appliquées sur la pièce ou sur l'ensemble de tests (en trois dimensions) sont représentatives de l'assemblage final monté sur la machine. Il n'y a aucun problème si nous testons sur une seule pièce. Par contre, pour un assemblage du fourreau, nous n'avons pu faire les calculs que sur une portion, qui contient évidemment la fenêtre en verre, à cause de la limitation du nombre de nœuds dans le maillage.

Nous exploitons des résultats en contrainte, en déformation pour chaque pièce, mais nous nous concentrons surtout sur le coefficient de sécurité et la marge de sécurité pour chacune de nos pièces. Pour information, le coefficient de sécurité pour les avions de chasse est de l'ordre de 2. Ces conditions sont choisies de manière extrêmement sévère, pour que l'on obtienne une marge de sécurité acceptable pour notre fourreau.

1^{er} essai : Fourreau entièrement transparent en verre

Dans le but de balayer toutes les solutions envisageables, on évalue par simulation numérique l'éventualité de faire le fourreau en verre. À cause de la limite du logiciel, nous n'avons fait la simulation que sur une partie du fourreau entièrement transparent. Le matériau testé est le saphir, puis le BK7. Le résultat de la simulation est très médiocre. Les figures suivantes représentent les résultats d'analyses. Le fourreau en saphir peut (avec beaucoup d'espoir) résister à nos conditions, mais l'usinage de ce fourreau sera très cher. Le fourreau en BK7 ne peut donc pas subir la pression maximale pendant la phase d'injection (1000 bars).

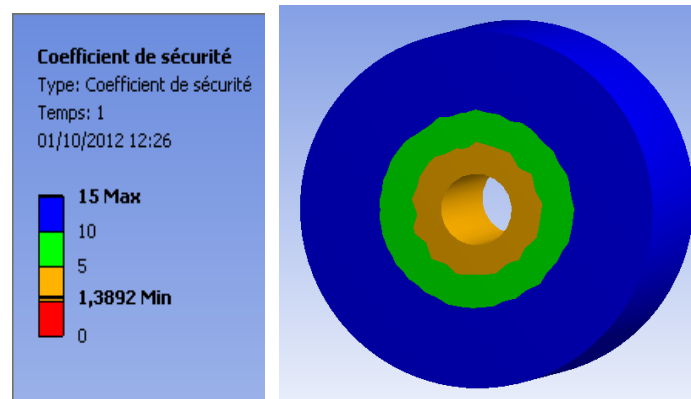


Figure 17 : Analyse d'un fourreau entièrement transparent **en saphir** : diamètre interne : 40mm, diamètre externe : 200mm, longueur 120mm, pression : 1000 Bars

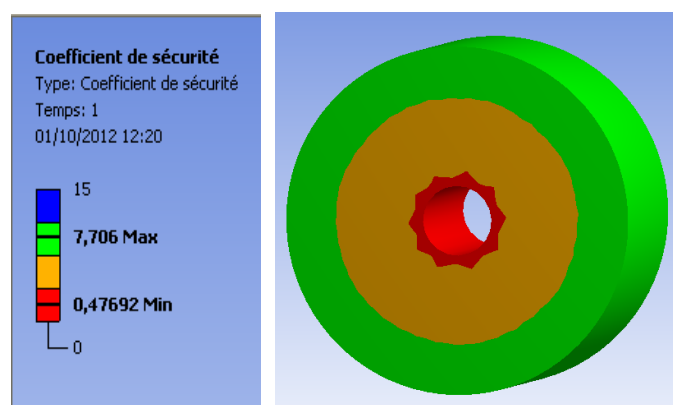


Figure 18 : Analyse d'un fourreau entièrement transparent **en BK7** : diamètre interne : 40mm, diamètre externe : 200mm, longueur 120mm, pression : 1000 Bars

2^{ème} essai : Première forme de la fenêtre en verre

Nous imaginons donc une forme de notre fenêtre, tout en considérant quelques conditions supplémentaires : la pièce en verre doit correspondre à la méthode d'observation que nous allons utiliser : méthode PIV – Cf. Chapitre "Caméras et système de visualisation", la fenêtre doit être une pièce insérée dans le fourreau. Il faut donc :

- Que les faces de visualisation sur les fenêtres en verre doivent être planes
- Que la forme doit être aisée à monter dans le fourreau
- Que la fixation entre le fourreau et la fenêtre reste à définir

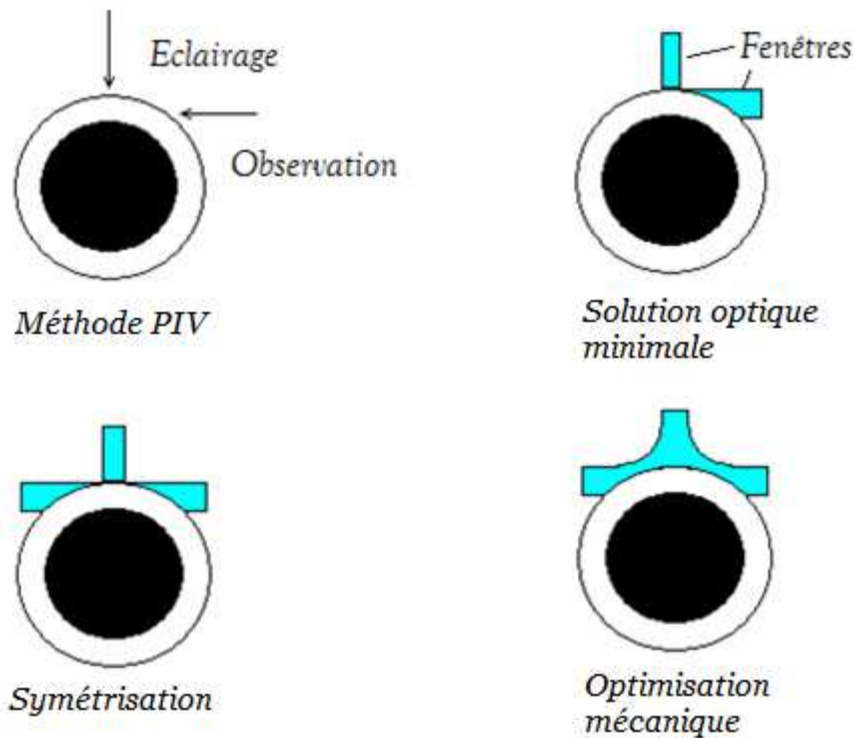


Figure 19 : Propositions de la forme des fenêtres en verre

D'après ces exigences, nous avons une première réflexion sur la forme du verre (Cf. Figure 19). La figure 20 montre notre première conception de fenêtre et l'ensemble d'une partie du fourreau est indiqué dans la figure 21. Pour que la forme de la fenêtre soit validée, nous avons fait des calculs sur cette pièce, avec le matériau choisit, BK7. Notre objectif est de chercher à avoir la valeur optimale de coefficient de sécurité sur la fenêtre en verre. Les résultats de calculs sur la déformation, ainsi que les contraintes dans la pièce nous aident à améliorer le design de la forme, pour atteindre notre objectif.

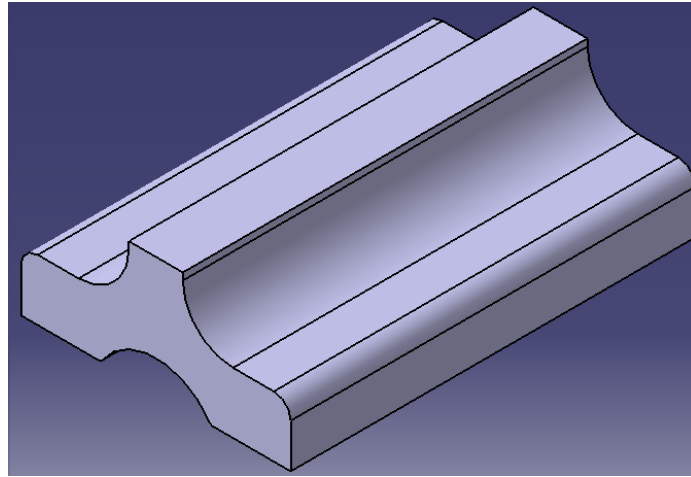


Figure 20: Première forme de fenêtre transparente

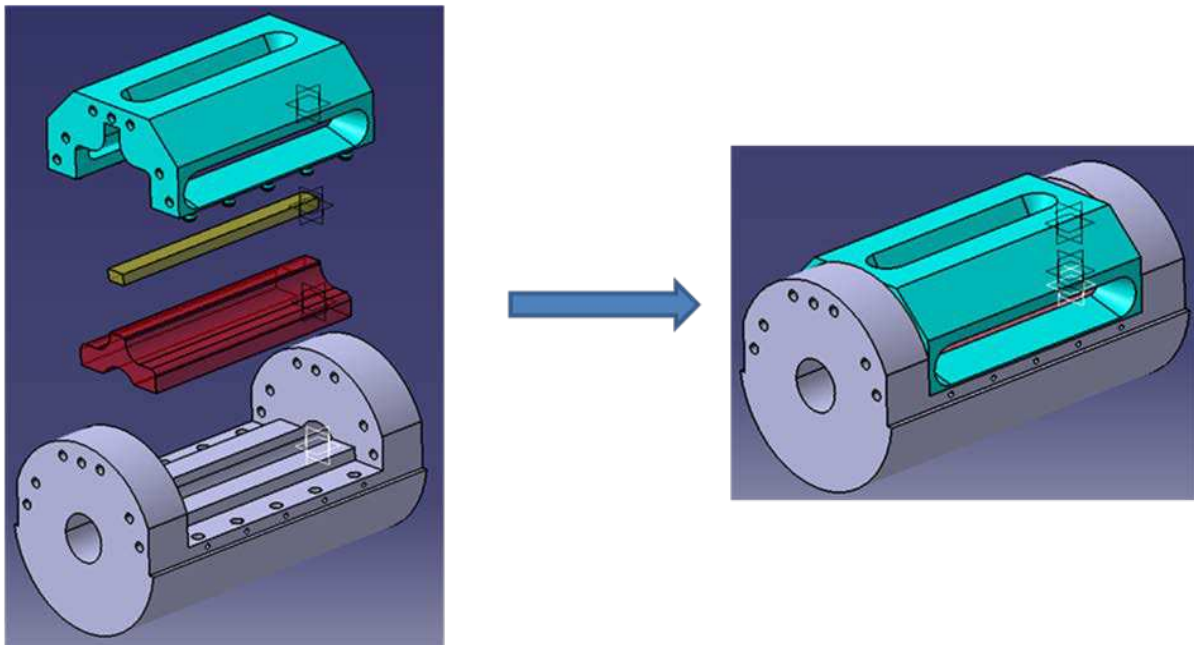


Figure 21: Premières conceptions de l'ensemble des pièces d'une partie du fourreau

Les conditions aux limites appliquées sur cette pièce présentée dans la figure 22 sont :

- Pression 500 bars, perpendiculaire à la surface de forme cylindrique, où passe la vis et la matière.
- Les fixations sont normales à la surface.

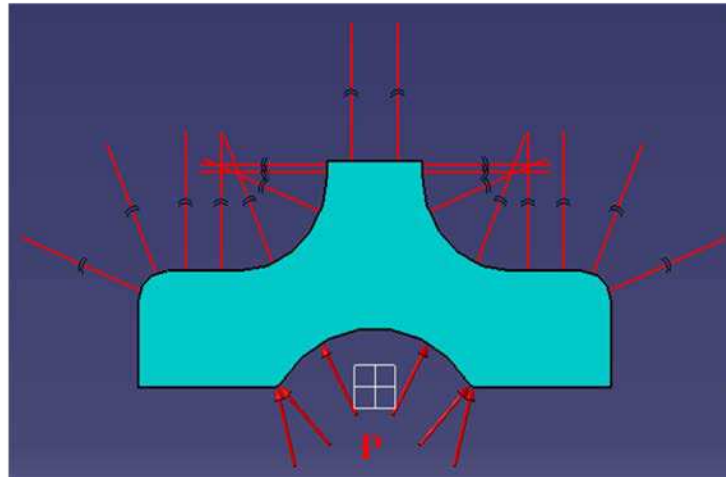


Figure 22 : Schéma des conditions aux limites appliquées sur la fenêtre en verre BK7

On a obtenu des résultats corrects sur le verre (Cf. Figure 23). Le coefficient de sécurité atteint 1,9 (proche du coefficient de sécurité des avions). Nous constatons que la zone la plus faible en coefficient de sécurité correspond à la plus grande déformation. La déformation se concentre au centre de la fenêtre, au niveau de passage d'ensemble vis-matière, mais cette déformation des fenêtres est faible et symétrique sous une pression très importante, ce qui ne nous pose pas de problème.

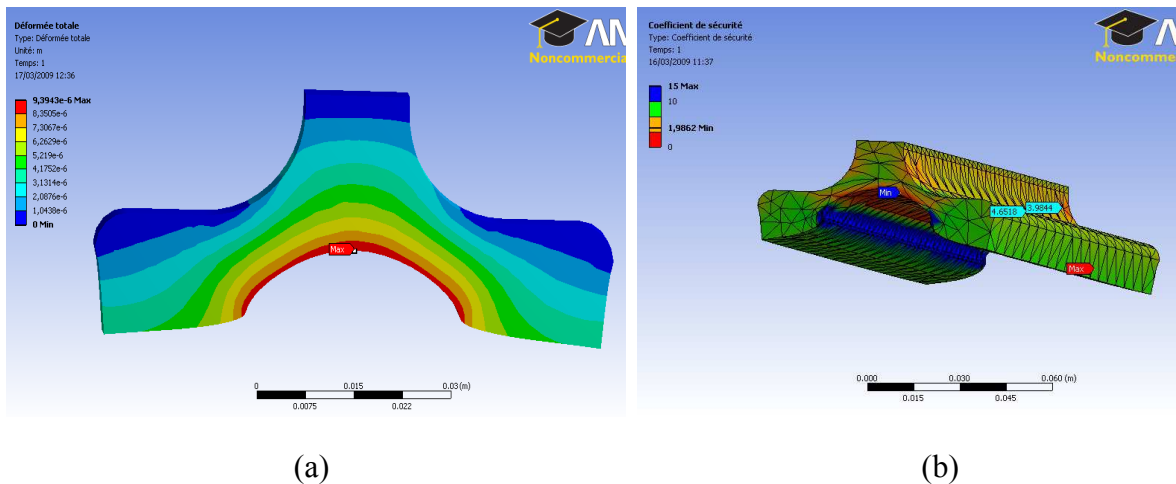


Figure 23: Résultat de simulation du calcul de résistance de matériaux sur la première forme de la fenêtre en verre BK7 sous ANSYS Workbench. (a) déformée totale de la pièce $9\mu\text{m}$ (b) coefficient de sécurité 1,9

On peut se poser la question de la justesse des résultats de simulation numérique pour un matériaux tel que le verre. Pour répondre à ces questions, nous avons décidé de faire un test de flexion 3 points sur un bloc de verre BK7 (dimension 76,2 mm x 76,2 mm x 12,7 mm). Le montage du test a été réalisé avec la machine à traction au laboratoire du Site de Plasturgie, en appliquant une force de valeur 7000N. Les contraintes représentent dans le bloc de verre

sont détectées par la méthode de photoélasticimétrie (Cf. Figure 25). Nous avons pu déterminer l'intensité des contraintes sur un bloc de BK7. En suite, on a reconstruit exactement le même montage de test sous logiciel ANSYS (Cf. Figure 24).

En comparant la forme des concentrations des contraintes sur le bloc de verres, nous obtenons exactement les mêmes images. Concernant les valeurs de l'intensité de contraintes, nous avons un écart inférieure à 10% d'erreur entre la simulation et la réalité. Les résultats de la simulation sont donc bien cohérents avec la réalité. Nous pouvons donc oublier notre inquiétude.

La courbe de la figure 25 donne la valeur d'intensité des contraintes représentée sur la ligne rouge dessinée sur la photo du bloc de verre (capturée par la méthode de photoélasticimétrie) ci-dessus. Il faut ajouter 5MPa à la courbe qui ne donne que des valeurs relatives. En zero sur la courbe, la simulation donne 5,4MPa.

Ayant obtenu des résultats assez remarquables sur la fenêtre (Cf. Figure 22), à partir de nos premières idées de l'ensemble (Cf. Figure 21) nous avons conçu l'ensemble total du fourreau, de longueur 1 mètre. Plusieurs designs ont été proposés, avec cette forme de la pièce en verre et avec différents systèmes de fixation des fenêtres (Cf. Figure 26).

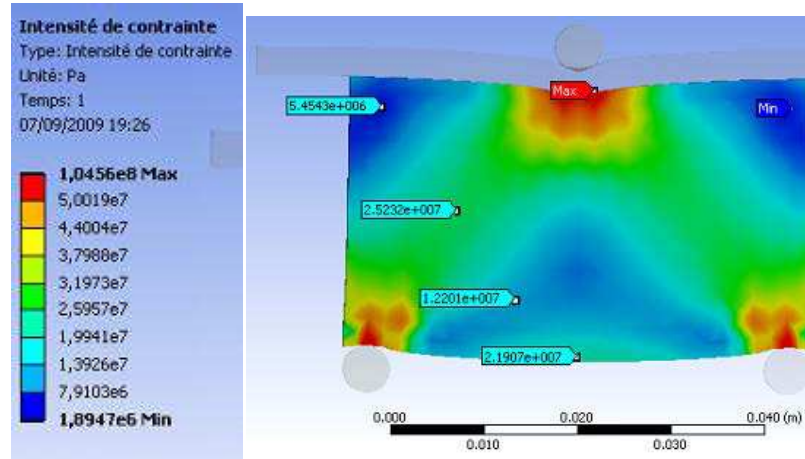


Figure 24: Test flexion 3 points sous ANSYS Workbench sur un bloc de verre de dimension 76,2 mm x 76,2 mm x 12,7 mm ; matière BK7 ; force appliquée 7000N.

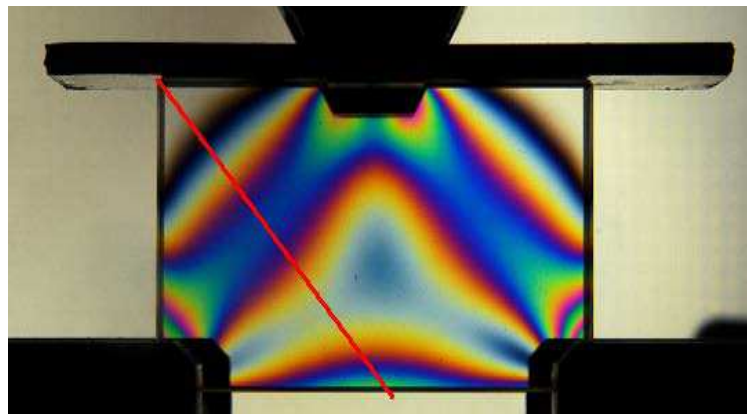
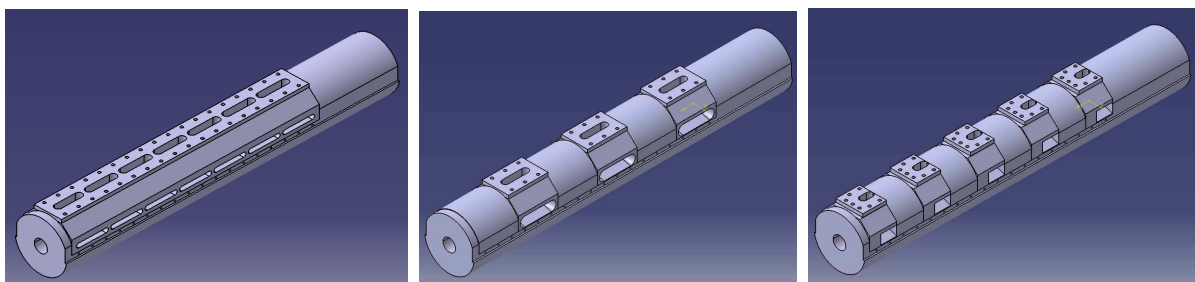


Figure 25 : Test flexion 3 points réalisé avec une machine de traction sur un bloc de verre de dimension 76,2 mm x 76,2 mm x 12,7 mm, matière BK7 ; force appliquée 7000N.



(a)

(b)

(c)

Figure 26: Différents designs du fourreau avec plusieurs longueurs de fenêtres en verre. (a) avec une seule fenêtre de longueur 720 mm ; (b) avec 3 fenêtres de longueur 120 mm ; (c) avec 5 fenêtres de longueur 40 mm.

Nous avons retenu une première solution d'assemblage de l'ensemble fourreau à fenêtres (Cf. Figure 27). Ce système est retenu car il est conçu avec 6 portions interchangeables, ce qui nous

permettra de suivre la plastification de polymère tout le long de la vis. Des barres de renfort sont fixées sur le fourreau et les pièces intercalaires par des vis. Le montage et le démontage de ce système sont donc faciles.

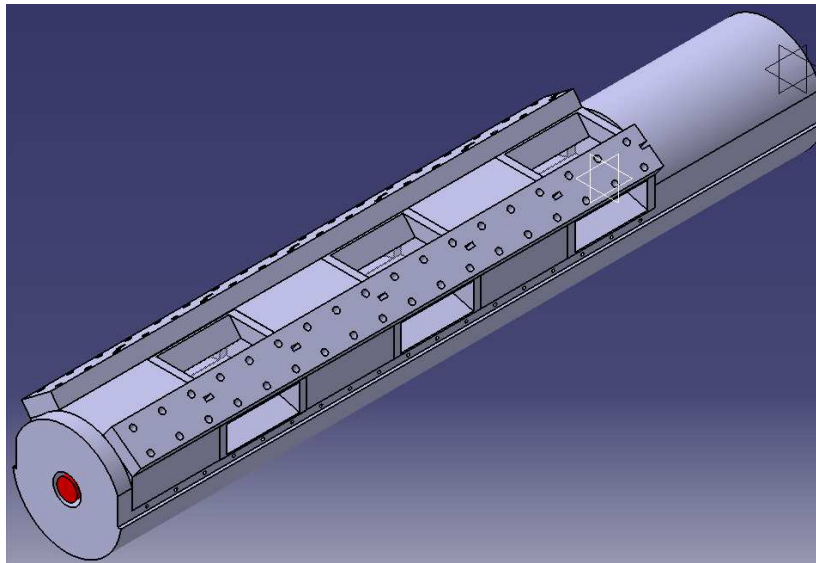


Figure 27: Première solution de l'assemblage du fourreau à fenêtres retenue

Pourtant, en analysant la solution avec plus d'attention et en consultant le fournisseur de la presse à injecter Billion, cette solution est rejetée très rapidement. Car avec ce montage, nous allons rencontrer beaucoup de difficultés pour mettre les colliers chauffant, ceux-ci sont très important pour chauffer l'ensemble vis-fourreau-matière. En plus de cela, la fixation facilite le montage et démontage, mais la rigidité de l'assemblage n'est pas vraiment sûre. Puis à la fin de la zone de pompage, où le polymère est totalement fondu et la vis est prête à injecter, la pression peut être très importante. Le risque d'éclater la fenêtre en verre fixée dans cette zone est élevé. Quel que soit le nombre ou le diamètre testé, la fixation par vis ne peut retenir les verres dans le fourreau, elles se détruisent. De plus la limitation d'Ansys en nombre de nœuds rend le résultat des simulations aléatoires.

N^{ième} essai : La forme déterminée

Par la suite, la conception de la fenêtre et de l'ensemble du fourreau s'intègrent dans le plan général d'un fourreau qui puisse s'adapter à la presse Billion H470 – 200T et à la vis 40 mm. Nous modifions une grande partie du fourreau pour pouvoir insérer nos fenêtres en verre, tout en évitant les zones critiques.

- Zone "extrémité droite" où passe la trémie : sur cette zone, nous ne pouvons changer ni la taille du fourreau, ni l'accroche. Il doit garder exactement la même conception, car on l'utilise pour attacher le fourreau avec la presse à injecter.
- Zone de clapet : cette zone contient la fin du polymère fondu, prêt à passer la buse pour être injectée dans le moule. La pression peut atteindre 2000 bars. La fenêtre en verre BK7 ne peut donc pas subir cette valeur trop importante.

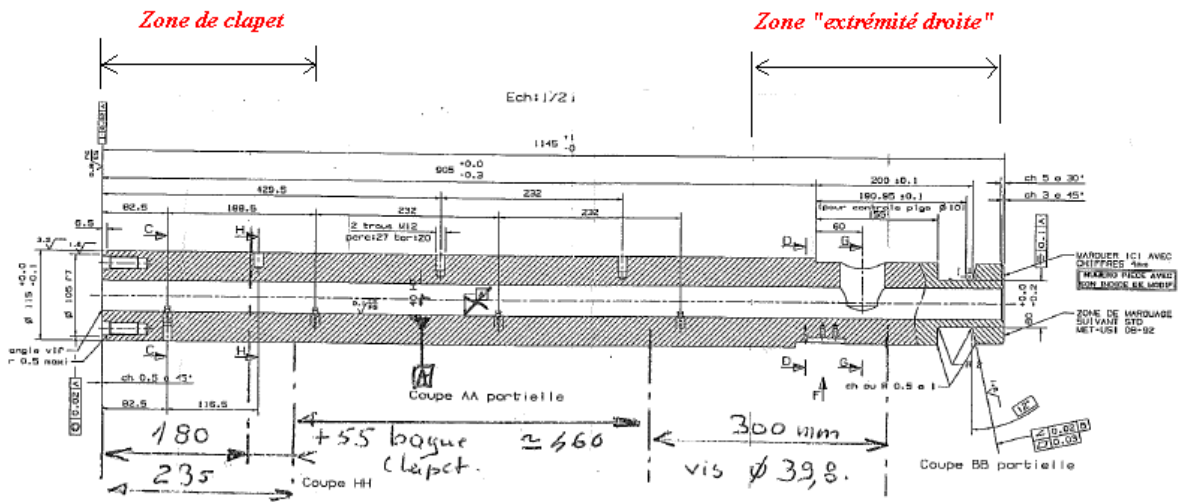


Figure 28: Extrait du plan du fourreau de Billion pour une vis de diamètre 40 mm

On se concentre sur une longueur de 620 mm du fourreau. Plusieurs formes sont dessinées, puis passées en simulation numérique. On reste sur notre objectif d'obtenir les meilleures valeurs de coefficient de sécurité. Cette fois ci, la simulation est réalisée non pas uniquement sur la fenêtre transparente, mais sur une partie du fourreau, en insérant la fenêtre en verre BK7. Des pièces intercalées entre le fourreau et la fenêtre sont ajoutées au fur et à mesure suivant les résultats du calcul. Elles occupent chacune un rôle essentiel dans l'assemblage du fourreau. Dans le chapitre suivant nous expliquerons plus en détail chaque pièce et leurs rôles dans notre système.

La forme de la fenêtre en verre est aussi déterminée à ce moment-là, d'après plusieurs calculs préliminaires. La figure 29 montre la forme finale de notre fenêtre. Ce design est complètement différent par rapport à la forme précédente. Cependant, avec cette conception, nous gagnons énormément d'avantages :

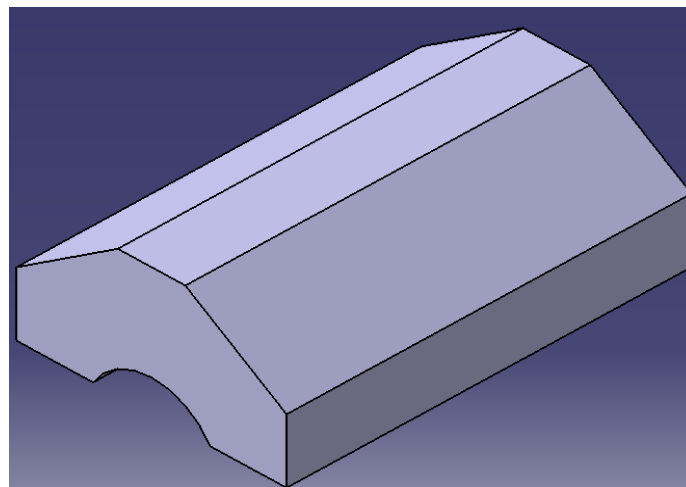


Figure 29: Design final de la fenêtre transparent pour le fourreau à fenêtres

- Elle garde toujours les faces planes pour la visualisation
- Par rapport à la première forme, elle est beaucoup plus simple. L'usinage de cette pièce est donc bien plus facile pour notre fournisseur de verre. Le coût de réalisation de ces verres est bien moins cher et reste raisonnable dans le budget total de notre projet.

À remarquer: Nous n'avons trouvé qu'un seul fournisseur, la société TRANSLUX – une PME qui est, depuis sa création en 1986, spécialisé en production de composants optique en verre, qui s'intéresse à notre projet innovant. Nous avons bien étudié ensemble le coût de réalisation des deux formes de pièces. Le coût annoncé pour l'autre forme est bien plus élevé à cause de sa complexité avec les trois congés.

- Le plus important, c'est qu'avec cette conception, nous obtenons la meilleure valeur de coefficient de sécurité. Nous allons les exposer dans le prochain chapitre avec l'ensemble des autres pièces du fourreau transparent.



CONCEPTION

Comme expliqué au chapitre précédent (Cf. Chapitre "Matériau transparent") le fourreau en lui-même ainsi que les autres pièces ne peuvent pas être dessinées individuellement. L'ensemble des pièces est créé en même temps avec la forme de la fenêtre en verre, afin de pouvoir faire la simulation sur l'ensemble des différentes pièces, calculer la résistance de l'ensemble sous des conditions extrêmes. La figure 30 présente l'avant-dernière conception du fourreau à fenêtre. Nous nous servons de ce concept pour faire des simulations numériques sous ANSYS Workbench.

L'assemblage comprend :

- 1 fourreau principal
- 1 vis d'injection de diamètre 40 mm.
- 3 fenêtres transparentes (couleur bleu cyan sur la Figure 30)
- 3 socles (couleur verte sur la Figure 30) + 6 joints (couleur rouge sur la Figure 30)
- 6 cales (couleur fuchsia sur la Figure 30)
- 12 vis M8

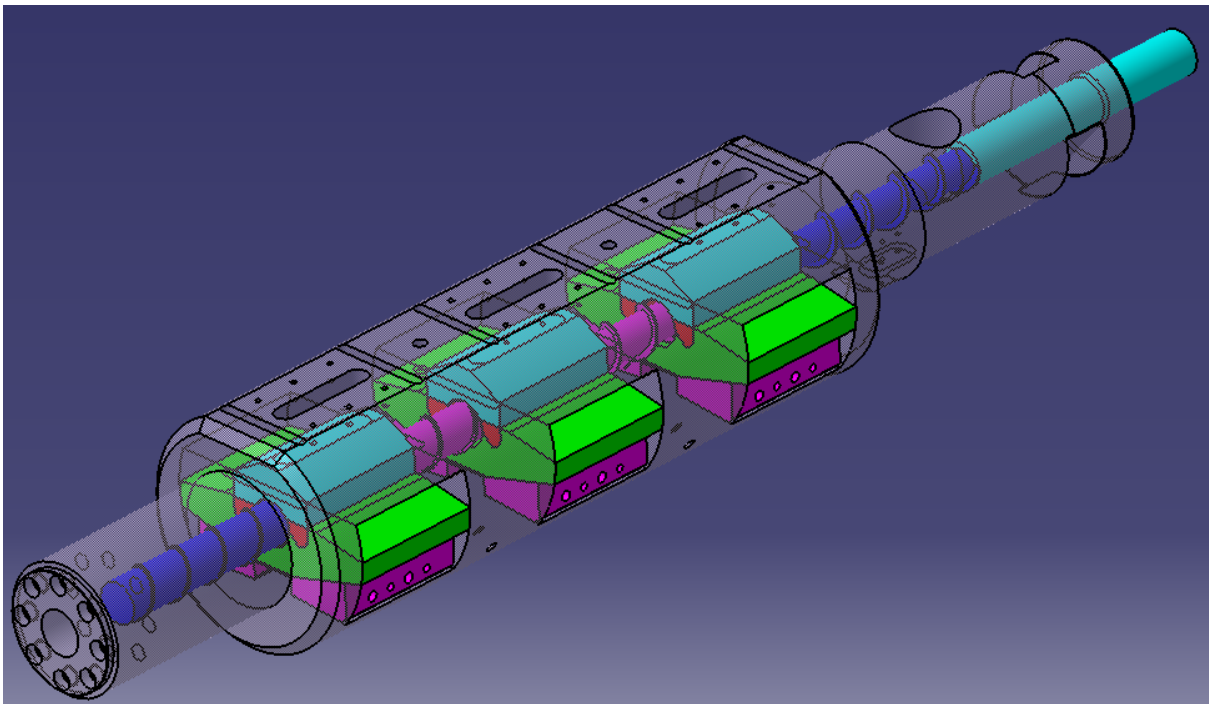


Figure 30: Avant dernière conception du fourreau à fenêtres

Les paramètres de matériaux utilisés :

- Les fenêtres : verre BK7
- Le fourreau principal : acier de nitruration 41CrAlMo7.10TR (nitruration gazeuse ; profondeur de 0,2 à 0,3 mm ; dureté de 900 à 1000 Vickers)
- Les socles, les cales et les joints : acier Z38CDV5 traité à 50/52 HRC
- Les vis M8 : acier à haute résistance

Les paramètres de ces matériaux sont présentés dans le tableau 7. Tout au début de nos calculs, nous avons utilisé les paramètres de l'acier standard proposés par le logiciel ANSYS. Une fois que nous avons déterminé notre conception, nous faisons des simulations avec des données mécaniques exactes des matériaux que nous allons utiliser. On accepte d'utiliser ces matériaux pour fabriquer notre dispositif seulement si les calculs de simulation numérique donnent les résultats désirés.

	Unité	Verre BK7	Acier 41CrAlMo7.10TR	Acier Z38CDV5	Acier standard
Module de Young	Pa	8,20E+10	2,15E+11	2,16E+11	2,00E+11
Coefficient de Poisson		0,208	0,3	0,3	0,3
Masse volumique	kg/m ³	2510	7850	7790	7850
Dilatation thermique	1/°C	8,30E-06	1,29E-05	1,26E-05	1,20E-05
Résistance en traction	Pa	6,90E+07	9,00E+08	1,38E+09	2,50E+08
Résistance en compression	Pa	6,90E+08	9,00E+08	1,38E+09	2,50E+08

Tableau 7 : Principaux paramètres des matériaux utilisés dans l'analyse théorique (ANSYS)

Les conditions aux limites :

- Tous les contacts entre chaque surface doivent être avec glissement, sans frottement.
- La pression appliquée : perpendiculaire à la surface (où traverse la vis), 500 bars.
- La température de travail : 300°C
- Le fourreau est fixé en 2 points

Dans les paragraphes suivants, nous vous présenterons la forme et les rôles de chaque partie dans notre l'assemblage final du fourreau à fenêtre, ainsi que les résultats de calculs de résistance de matériaux. Les résultats des contraintes sur chaque pièce nous permettent de voir où sont les points faibles de notre système, pour que nous puissions modifier la conception des pièces en même temps. Ici nous exposons des résultats de la déformation de l'ensemble et des coefficients de sécurité.

1 La conception et les rôles des pièces

1.1 La fenêtre

La fenêtre est transparente et permet de visualiser les phénomènes qui se passent à l'intérieur de l'ensemble de vis-fourreau, grâce à un système de visualisation par méthode PIV (Cf. Chapitre "Caméras et le système de visualisation"). Elle est faite en BK7 avec une excellente transparence. La fenêtre est tenue dans le fourreau principal dans un emplacement conçu spécialement pour elle. Elle est ensuite bloquée par l'ensemble des pièces intercalaires (le

socles, les joints et les cales). La fenêtre est taillée suivant la forme montrée dans la figure 31. Une face est taillée en forme cylindrique pour le passage de la vis de diamètre 40 mm. Le diamètre de cette forme est de 20,05 mm pour éviter que la vis ne touche la surface en verre lors de sa déformation due à la température et par flexion.

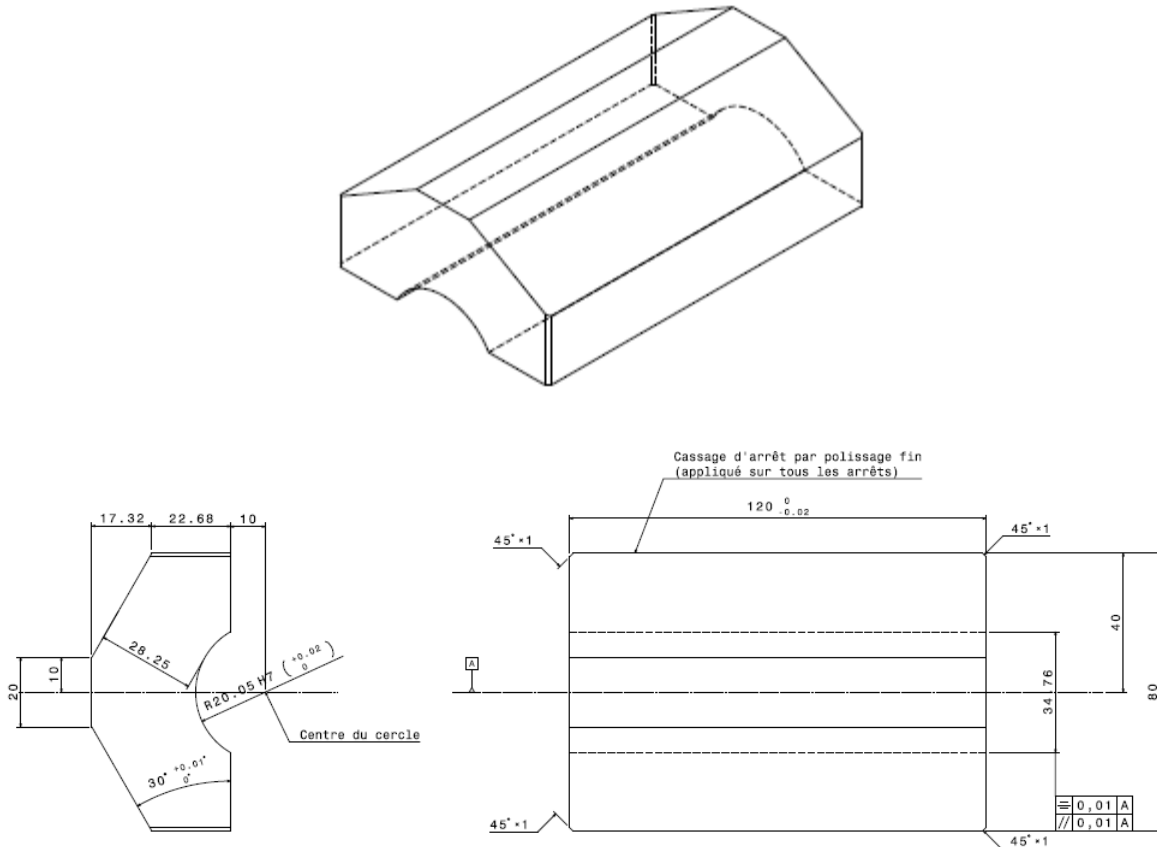


Figure 31: Forme et dimensions de la fenêtre en verre

La fenêtre en verre fait 120 mm en longueur, 80 mm en largeur, et 40 mm en épaisseur, dont les trois faces qui assureront l'observation dans le système vis-fourreau ont les mêmes dimensions : 20 mm x 120 mm. Nous avons la visualisation sur les trois chenaux de la vis pour chaque fenêtre. Sur la longueur de 610 mm du fourreau, nous mettons trois fenêtres en verre BK7 pour assurer l'observation sur les trois zones de la vis.

1.2 Le fourreau

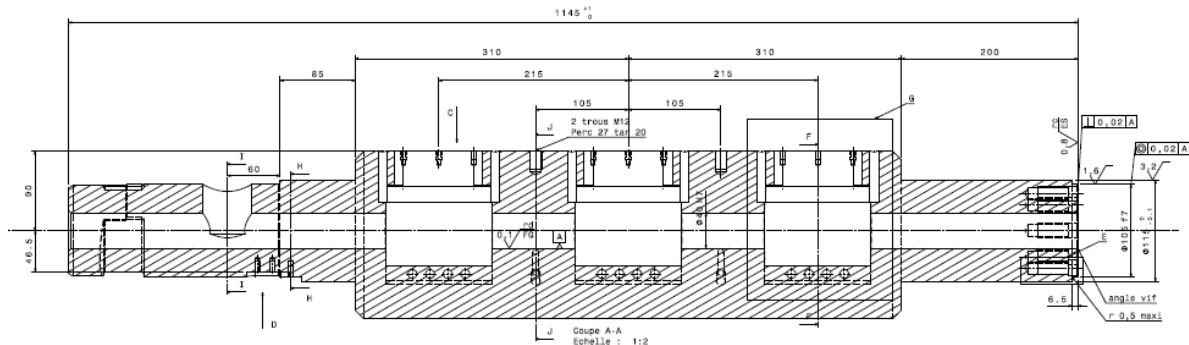


Figure 32: Plan du fourreau dans sa totalité

Le fourreau normal avec la vis d'injection a pour office d'emmener la matière de la trémie jusqu'au moule. En plus de ce rôle, notre fourreau, qui sera usiné en acier 41CrAlMo7.10TR, a des parties transparentes, les fenêtres en verre BK7, qui permettent d'observer les phénomènes dans matière. Il faut donc protéger les fenêtres en verre.

Suivant le plan d'un fourreau normal pour une vis d'injection de diamètre 40 mm (Cf. Figure 32), nous adaptons le fourreau par rapport aux fenêtres en verre. L'extrême gauche (partie trémie) et l'extrême droite (partie clapet) ne sont pas changés. Ils gardent leur taille, leur forme, le passage de la matière depuis la trémie, les accroches, les trous taraudés pour les vis. Le diamètre de ces deux parties inchangées fait 115 mm. La longueur totale du fourreau fait 1145 mm (1,145m).

Nous avons décidé de placer les fenêtres en verre sur une longueur de 610 mm au milieu du fourreau principal. Sur cette partie, le fourreau contient une forme cylindrique sur une grande partie, puis une surface plate qui permet de mettre les barres pour fixer les colliers chauffants (Cf. Figure 33). Le diamètre du fourreau sur cette partie est de 200 mm (presque le double de diamètre d'un fourreau normal), ceci afin de garantir la protection des pièces en verre, car nous avons besoin d'ajouter plusieurs pièces intercalaires pour les tenir.

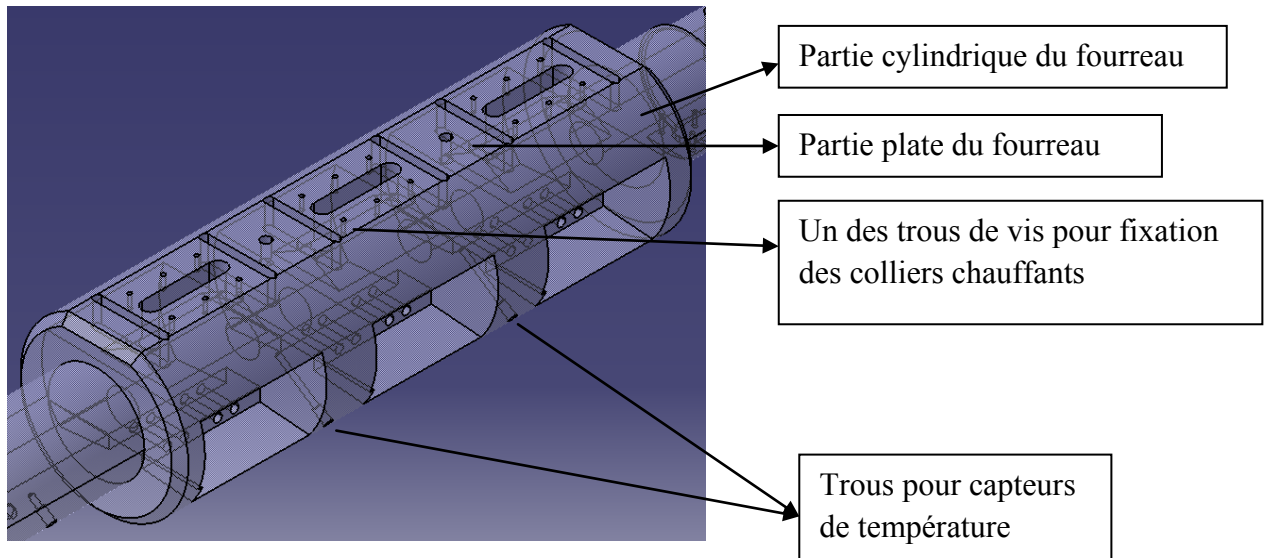


Figure 33: Extrait du fourreau, partie modifiée avec un diamètre de 200 mm.

Dans le bloc "hors norme" du fourreau, nous avons créé un emplacement pour le verre. Ce dernier sera usiné exactement à la même forme que la partie supérieure de la pièce transparente (Cf. Figure 34). Le verre sera en appui sur le fourreau par deux faces inclinées, et emboîté dans le fourreau par les deux côtés. Les trois emplacements pour les verres sont arrangés successivement. Entre chacun, les blocs d'acier ont la même longueur que les verres (120 mm). Ils assurent la symétrie sur la longueur totale du fourreau, et ont pour but de bien tenir les fenêtres en verres. En plus, ces blocs en acier nous donnent de la place pour ajouter les capteurs des colliers chauffants, afin de pouvoir contrôler la température pendant l'injection. L'usinage de ces emplacements sera fait avec une méthode spéciale pour assurer un contact parfait entre l'acier et le verre, et pour ne pas casser le verre. Nous l'expliquerons plus en détail dans le chapitre "Usinage" qui lui est consacré.

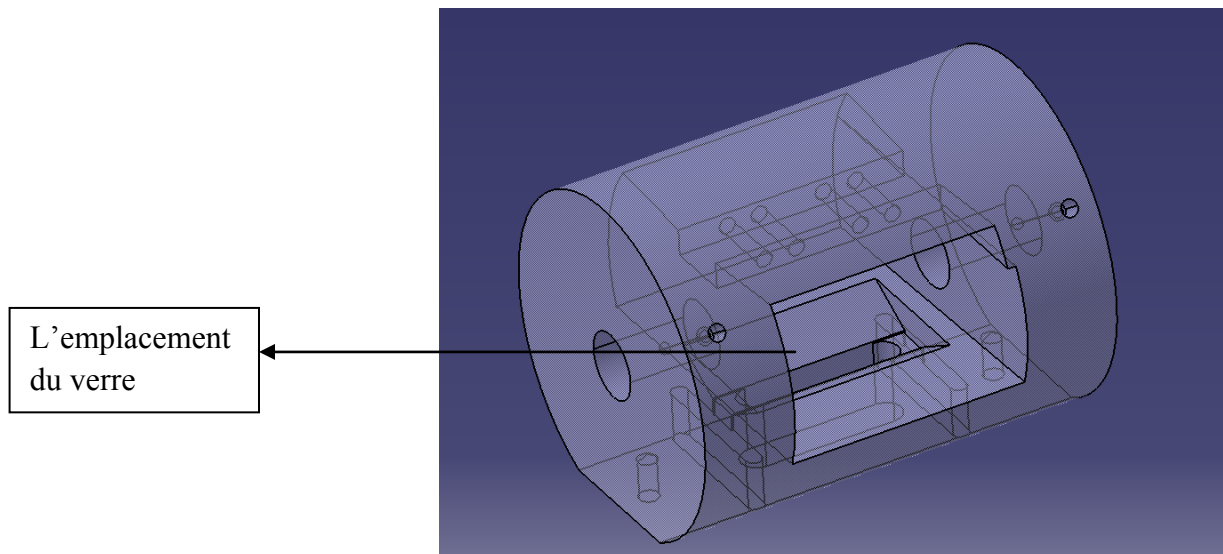


Figure 34: Emplacement du verre (extrait du fourreau principal)

Pour que nous puissions utiliser l'avantage de la pièce transparente, il y a deux ouvertures (ouverture 1 et 2 – Cf. Figure 35) qui permettent de faire passer la lumière et d'accéder aux caméras. Le montage du système de visualisation est consultable dans le chapitre "Caméras et système de visualisation".

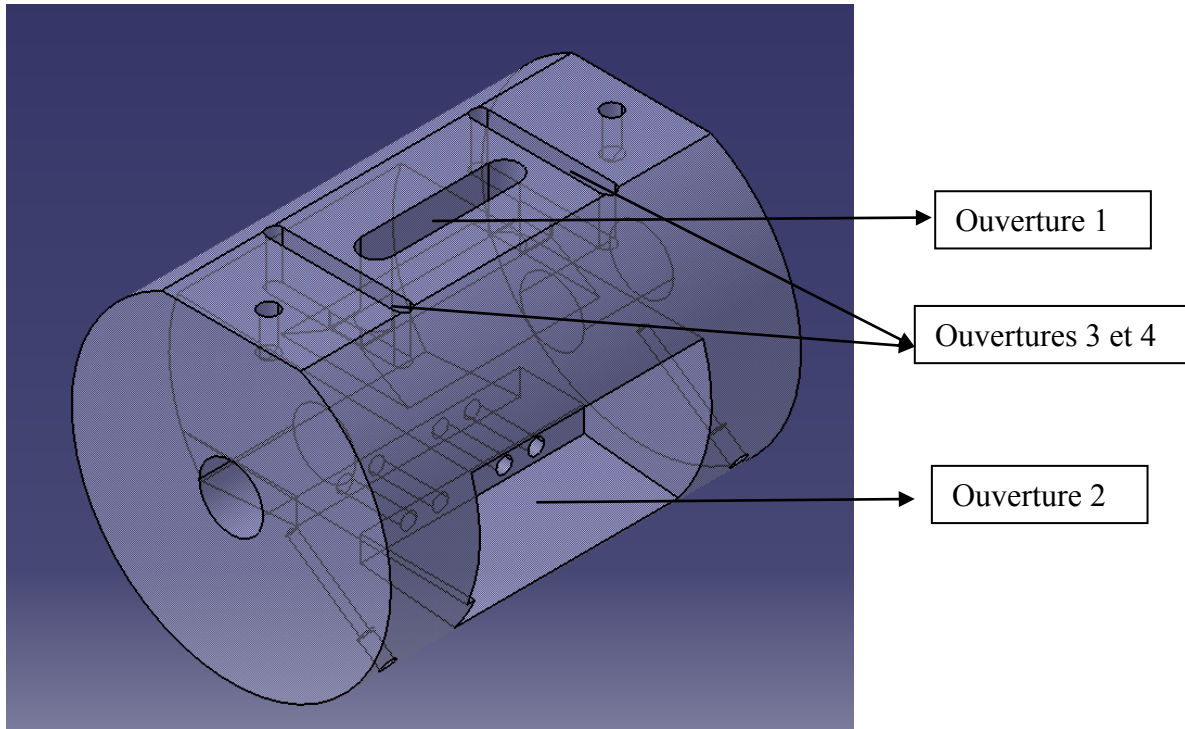


Figure 35: Ouvertures dans le fourreau (extrait du fourreau principal)

Deux autres ouvertures (ouverture 3 et 4 – Cf. Figure 35) servent à diminuer la déformation par flexion de la fenêtre en verre. La décision de ménager ces ouvertures a été prise après les résultats du calcul de structure. En fait, sans ces deux ouvertures, la fenêtre en verre est compressée par l'acier car elle est en appui sur le fourreau par les quatre faces. Par contre, le verre est en contact avec l'air libre au niveau de l'ouverture 1. Sous la pression exercée sur la surface intérieure (passage de la vis), le verre se déforme en flexion. Le risque de casser la fenêtre par cette déformation est très important. En créant des deux ouvertures 3 et 4, la déformation se fait plus par translation que par flexion au niveau du verre, et le risque d'éclatement du verre aux extrémités dû à la résistance de l'acier est diminué.

1.3 Les socles et les joints

Tout au début de la conception, les joints n'existaient pas. Le verre n'était tenu que par le socle. Les résultats de déformation de l'assemblage nous montre qu'il y a un jour entre le verre et le socle, malgré tous les systèmes de renforcement possible que nous avons pu imaginés (mesure, simulation). La raison est que la pression exercée normale à la surface est en même temps sur le socle en acier et la fenêtre en verre, et comme ces deux pièces ne font pas un seul bloc, elles se déforment par compression dans les deux directions opposées. Même si on diminue la valeur de pression, la réponse du système reste toujours la même, avec

moins de déformation bien sûr, mais il y a toujours un espace entre la fenêtre et le socle, ce qui produirait des fuites de matière pendant l'injection. Nous pensons donc qu'il faut une pièce insérée pour pouvoir empêcher l'existence de ces fuites.

Les joints sont créés pour ce rôle très important : bloquer la fuite de polymère en phase plastification. Le schéma suivant (Cf. Figure 36) explique le principe de ce système. Les joints sont en effet une partie du socle initial, au lieu de faire une seule pièce, nous décidons de tailler dans le socle deux petites pièces de forme identique. La pression appliquée sur l'ensemble des surface va pousser les deux languettes très fines, et les parties des joint exposées au polymère. Ces deux languettes se déforment et poussent les joints verticalement. Les joints viennent plaquer contre la fenêtre en verre, et boucher l'écart entre le verre et le socle, ce qui empêche les fuites de matière.

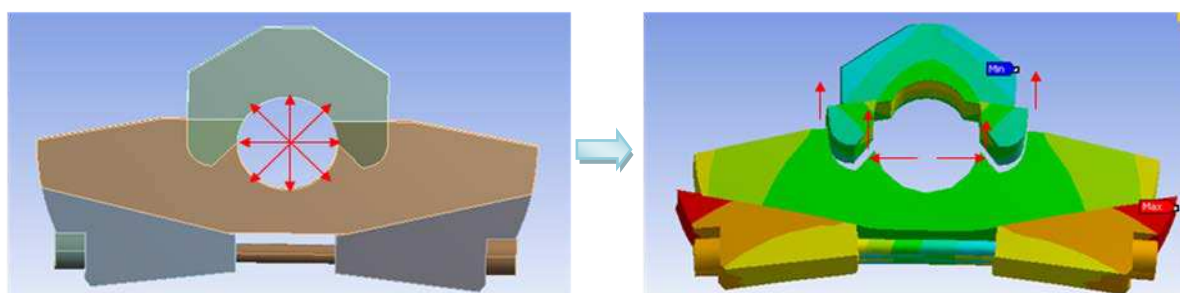


Figure 36: Schéma explicatif du rôle des joints par déformation de l'ensemble de système fourreau à fenêtres sous une pression de 500 bars.

1.4 Les cales et les vis M8

Les cales complètent les contacts entre le fourreau et l'assemblage socles – joints – verres. Les socles sont en appui sur les cales, et ces dernières sont vissées sur le fourreau pour renforcer tout le système qui retient la pièce en verre. Les vis M8 servent à fixer tout l'ensemble des pièces intercalaires avec le fourreau principal. Elles ne sont pas serrées quand les pièces sont froides (25 °C). Les pièces sont justes en contact l'une avec l'autre à température ambiante. Une fois que tout l'ensemble est chauffé à la température nécessaire, nous serrons les vis en contrôlant les concentrations de contrainte dans les fenêtres par biréfringence. À ce moment-là, toutes les pièces sont bien serrées, et le dispositif est prêt à être utilisé.

1.5 Les colliers chauffants et les barres de fixations

Dans l'ensemble de vis-fourreau, les colliers chauffants servent à chauffer par conduction et réguler l'ensemble du système à la température de travail du polymère utilisé. Ils ont des formes circulaires, qui permettent d'entourer le fourreau cylindrique. Pour fonctionner, ils sont reliés directement au système électrique de la presse. Il existe plusieurs types de colliers chauffants correspondant aux puissances demandées. En général, pour les fourreaux des presses à injecter, on utilise souvent les colliers de type céramique, ou bien de type mica.

Pour la longueur totale du fourreau, nous avons besoin de cinq colliers chauffant. À part les colliers chauffants standards pour la partie non modifiée du fourreau (partie clapet) et pour la buse, les autres devront être conçus par nous même pour s'adapter aux parties contenant les fenêtres en verre BK7. Les colliers doivent comprendre quatre ouvertures :

- 2 ouvertures pour que nous puissions observer à travers les fenêtres transparentes
- 2 ouvertures pour que nous puissions accéder aux vis afin de serrer les cales (pour serrer l'ensemble des pièces)

Les fabricants spécialisés en colliers chauffants, indiquent qu'il n'y aura pas de danger à faire des ouvertures sur les colliers. Nous décidons de faire un collier pour chaque fenêtre. Nous gardons la forme cylindrique des colliers normaux, tout en modifiant des accroches pour pouvoir les fixer sur l'ensemble. Sur chaque collier, il y a donc quatre ouvertures pour accéder aux fenêtres en verre et aux vis. Figure 37 représente un exemple de notre collier chauffant, spécialement conçu pour le fourreau à fenêtre. Ces trois colliers seront montés sur l'ensemble du fourreau en les attachant à deux barres en acier, fixées sur la surface plate du fourreau (Cf. Figure 38)

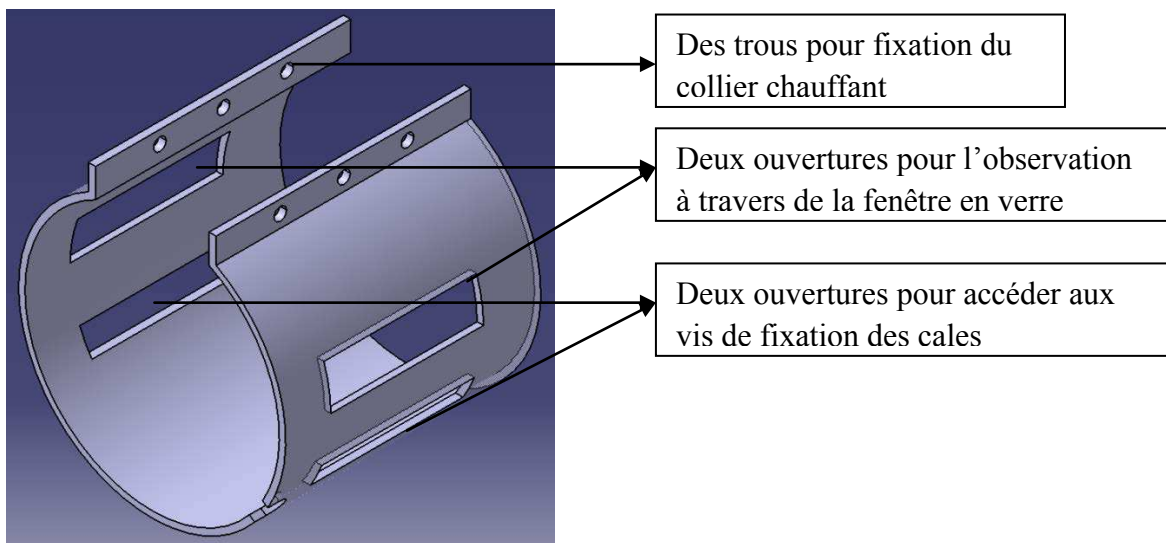


Figure 37 : Un des trois colliers chauffants spéciaux

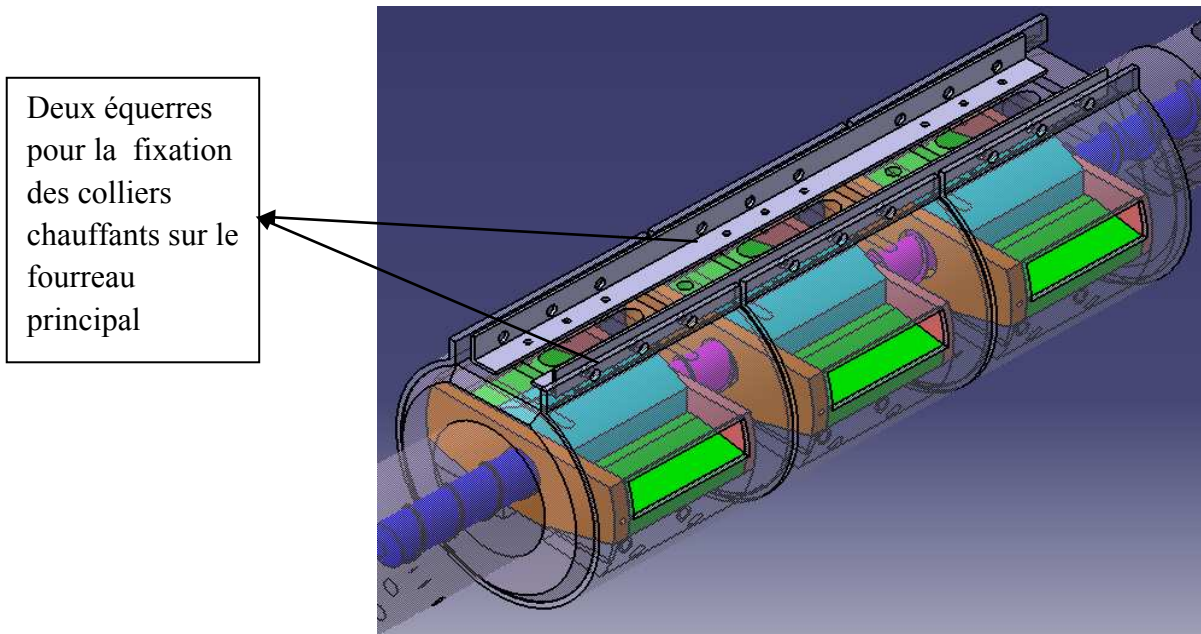


Figure 38: Extrait du fourreau avec les deux barres de fixation des colliers chauffants

2 La déformation

2.1 Déformation de l'ensemble du système

La déformation du système est un point important. Dans le procédé d'injection, l'entrefer vis-fourreau autorisé est de $50 \mu\text{m}$, alors que notre résultat donne $75 \mu\text{m}$ (Cf. Figure 39). Une fuite de matière sera peut-être présente dans l'entrefer entre le sommet du filet et le fourreau diminuant les capacités de pressurisation de la vis. Cependant, ce résultat est obtenu dans des conditions d'analyse théorique très sévères. En réalité, nous travaillerons avec des conditions moins strictes, en termes de température et de pression

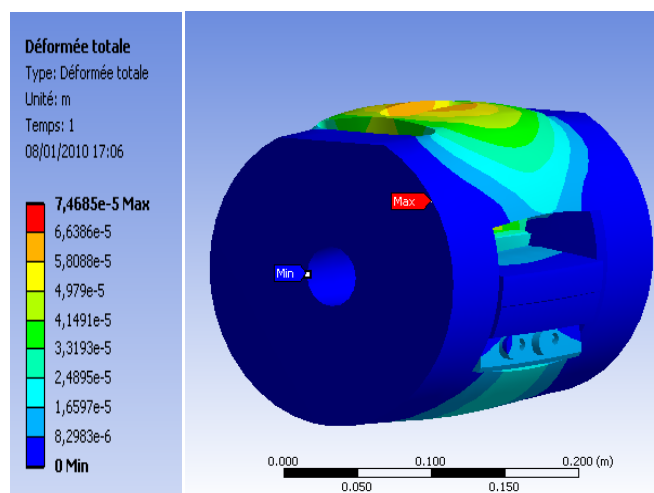


Figure 39: Déformation d'une partie d'assemblage du fourreau à fenêtres

2.2 Déformation de la vis

Une autre question se pose : "Si la vis, au cours du chargement, se déforme, va-t-elle endommager la pièce en verre ? "

D'après *Y. Bereaux et al [15]*, le gradient maximal de la pression est de 2 MPa/tours (Cf. Figure 40). Nous avons repris cette valeur et fait une simulation sur une portion de la vis (longueur de test 120 mm – 3D). Sous cette condition, la flexion maximale de la vis est de 8,5 μm (Cf. Figure 42). Et dans le cas d'un chargement brutal (un gradient accidentel à 10 MPa), on a une déformation de la vis de 41 μm (Cf. Figure 41). Comme l'espace entre la vis et la fenêtre en verre est de l'ordre de 50 μm , cette dernière valeur est donc sûre.

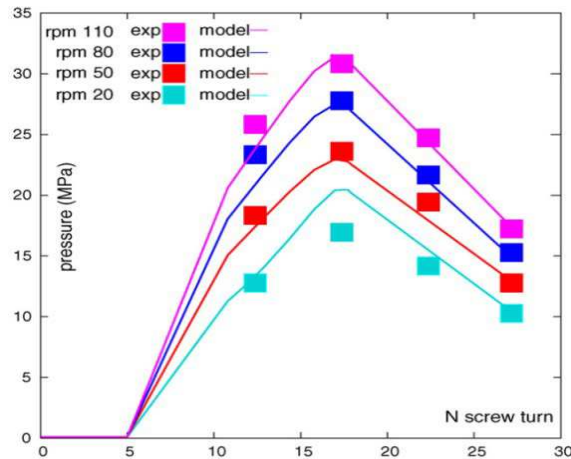


Figure 40: $Pression = f(\text{nombre de tours de la vis})$ dans le système vis – fourreau, *Y. Bereaux, J.Y. Charmeau, M. Moguedet, J. Mater. Process. Technol. 2009*

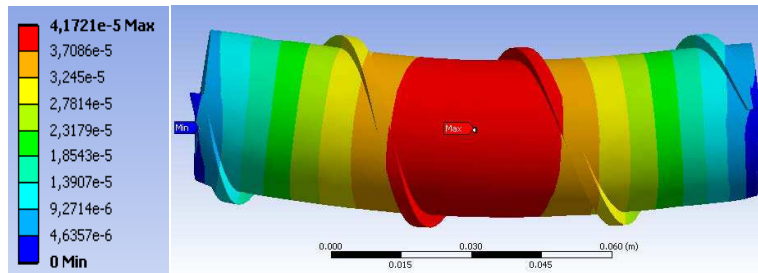


Figure 41: Déformation d'une partie de la vis sous un gradient de pression à 10 MPa

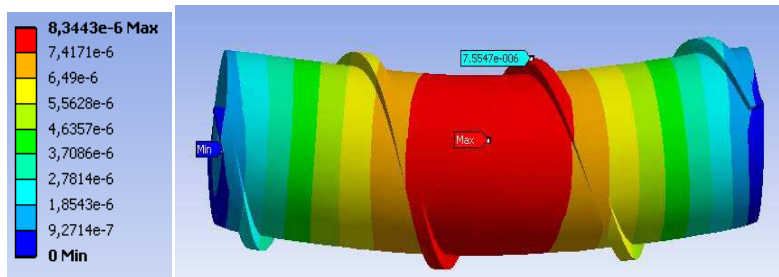
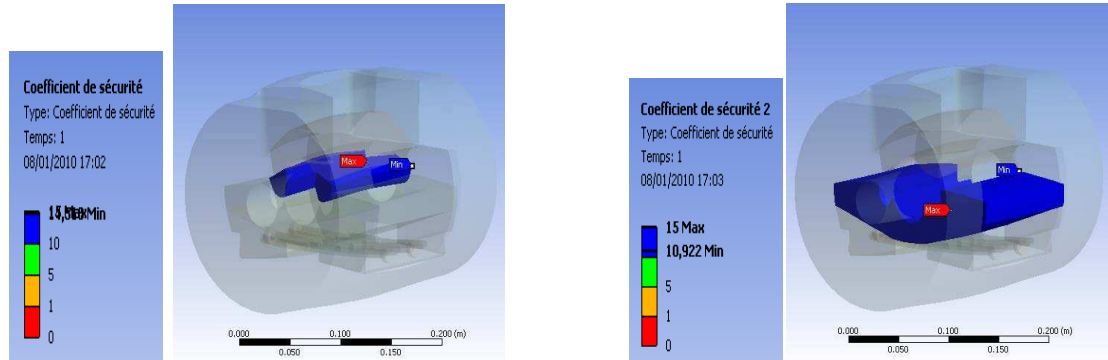


Figure 42: Déformation d'une partie de la vis sous un gradient de pression à 2 MPa

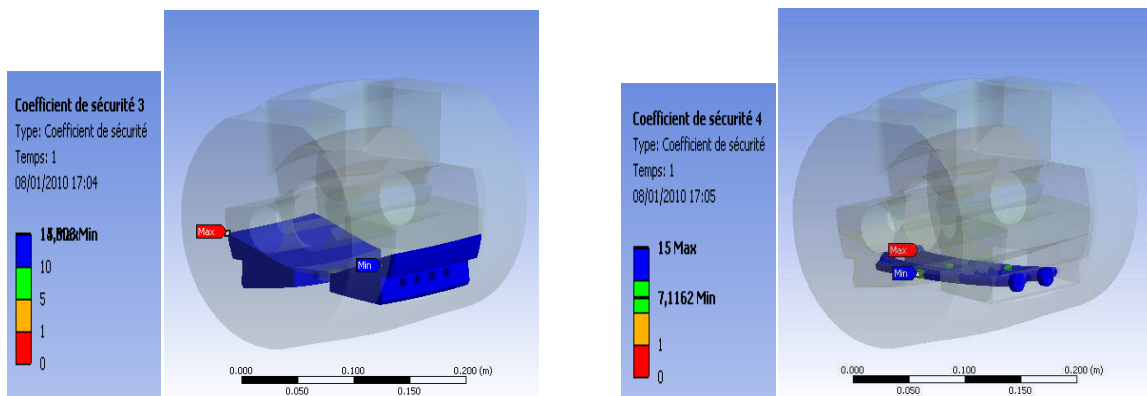
3 Coefficients de sécurité

Nous nous intéressons tout d'abord aux coefficients de sécurité pour chaque pièce en analysant une partie de l'assemblage du système fourreau à fenêtres. Les valeurs se trouvent dans la Figure 43 suivante :



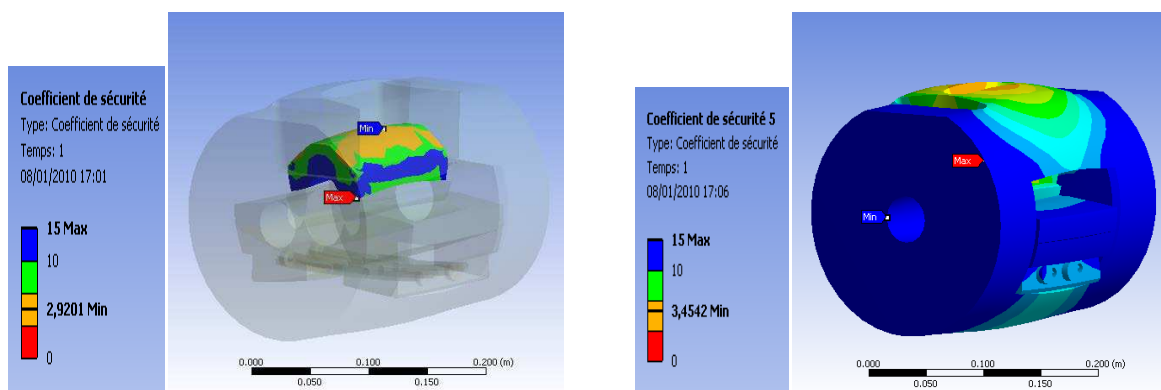
Coefficient de sécurité pour les joints 14,95

Coefficient de sécurité pour les socles 10,92



Coefficient de sécurité pour les cales 14,98

Coefficient de sécurité pour les vis 7,12



Coefficient de sécurité pour les fenêtres 2,92

Coefficient de sécurité pour le fourreau 3,45

Figure 43 : Résultats des coefficients de sécurité pour chaque pièce dans l'ensemble de fourreau à fenêtres (simulation par ANSYS Workbench)

Les coefficients de sécurité nous donnent une première idée de la résistance du système soumis à l'ensemble des conditions sévères imposées dans les calculs. Les résultats sont assez prometteurs. Nous constatons que pour les socles, les joints et les cales, les coefficients de sécurité sont bien supérieurs à 10, et donc la résistance de ses pièces est convenable. Les coefficients pour la fenêtre et le fourreau sont un peu bas. Par contre, les conditions de test sont des cas extrêmes, et comme c'est le meilleur résultat trouvé après plusieurs analyses, il reste dans la fourchette des coefficients de sécurité acceptables dans plusieurs domaines de mécanique, nous validons donc ce test. Nous devons donc faire très attention en travaillant avec l'ensemble du système. Il faut surtout éviter des chocs brutaux qui conduisent à une augmentation des contraintes internes, les verres risquant d'éclater très vite.

4 Thermique

4.1 Chauffe - Refroidissement

Une autre complexité qui se pose au milieu de notre projet est le problème thermique de l'ensemble du système "fourreau à fenêtre". Les pièces en acier se dilatent différemment par rapport à nos fenêtres en verre. En chauffant, l'acier se dilate beaucoup plus vite, et bien sûr en refroidissant, l'acier se rétracte aussi plus rapidement que le verre, comme indique dans la Figure 44 et Figure 45. En plus, d'après le fournisseur de verre BK7, il ne faut pas que le gradient de température présent dans la pièce dépasse 50°C . On devrait donc faire très attention pendant ces deux phases de manipulation afin de ne pas abimer les fenêtres en verre. En attendant la réalisation du fourreau, quelques tests thermiques sont effectués, numériquement et expérimentalement.

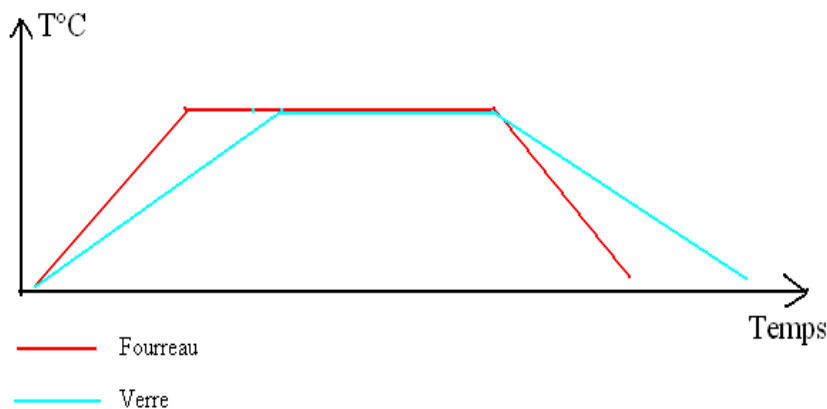


Figure 44 : Comportement thermique du fourreau en acier et de la fenêtre en verre BK7

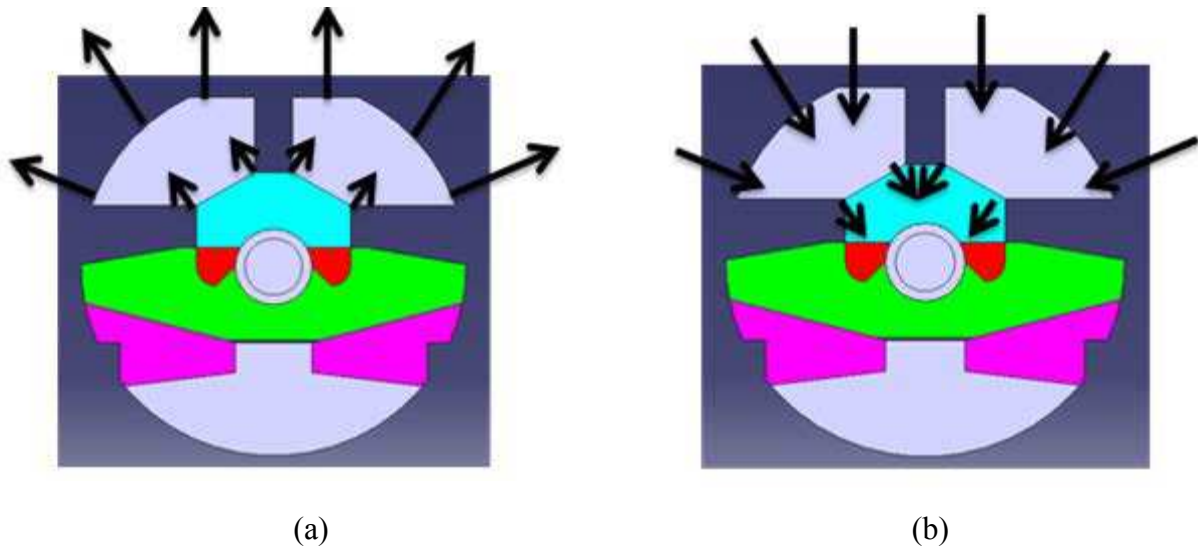


Figure 45 : Illustration du phénomène de dilatation et de rétraction de l'ensemble "fourreau à fenêtres". (a) Dilatation à la chauffe et (b) Rétraction au refroidissement

4.1.1 Simulation numérique

Le but de cette analyse est de trouver un moyen pour chauffer l'ensemble du fourreau à fenêtre de manière progressive, tout en évitant un gradient de température trop important dans le verre. Avec nos profils de l'ensemble fourreau/polymère/vis, nous appliquons un flux de chaleur à l'ensemble du système. Dans ce cas, nous appliquons un flux de chaleur de 10^5 W/m² sur les zones qui contiennent le verre, et 10^4 W/m² sur les zones contenant l'acier. Nous mettons les paramètres de chauffe pendant un temps de 10h. Le résultat obtenu est présent dans la courbe de la Figure 46. Nous constatons que les températures des trois parties : fourreau en acier, polymère, et fenêtres en verre augmentent ensemble et progressivement pendant la chauffe. Le gradient de température entre chaque partie est très faible. Et surtout à aucun moment la différence de température dans le verre atteint 50°C.

Par contre, dans cette simulation, nous avons fait une importante erreur : en réalité, pendant la mise en chauffe de l'ensemble du système, il n'y a pas de présence de polymère, alors que dans la simulation que nous avons faite, le polymère chauffe en même temps. Ce qui induit moins de différence de température dans nos pièces en verre. Malgré tout, cette simulation nous confirme que la différence de température ne dépasse pas 30°C dans les fenêtres en verre BK7 et dans le polymère lorsque tout le système atteint la température souhaité.

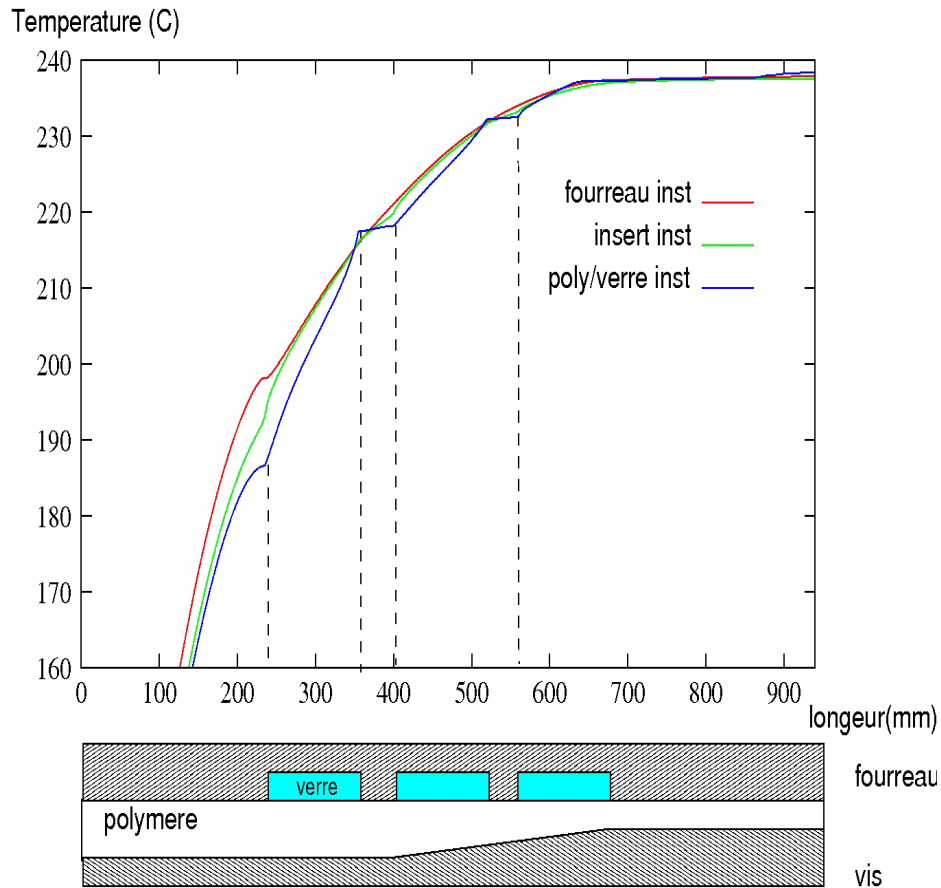


Figure 46 : Profil de température dans l'ensemble fourreau – polymère – verre par simulation numérique

4.1.2 Expérience thermique - contraintes

Cette expérience est réalisée dans le but d'étudier la variation de contraintes présente dans le verre pendant la phase de chauffe et de refroidissement. Le montage de test (Cf. Figure 47) reconstitue les conditions que les fenêtres en verre devront subir dans l'ensemble des pièces en acier.

✚ Les conditions de test :

- On utilise un régulateur de température pour contrôler la rampe de montée à 1°C/min. La température maximale est de 300°C
- L'assemblage est juste mis en contact, pas de pression, comme dans l'ensemble de fourreau à fenêtre avant la chauffe, pour assurer qu'il n'y a pas de contraintes dans la pièce en verre.
- Le test se déroule en 3 phases : Chauffe jusqu'à 300°C, stabilisation pendant 30 minutes, puis refroidissement jusqu'à 100°C
- Nous prenons les photos de contraintes du verre toutes les minutes pendant l'expérience par méthode de biréfringence (lumière polarisée - filtre polarisant).

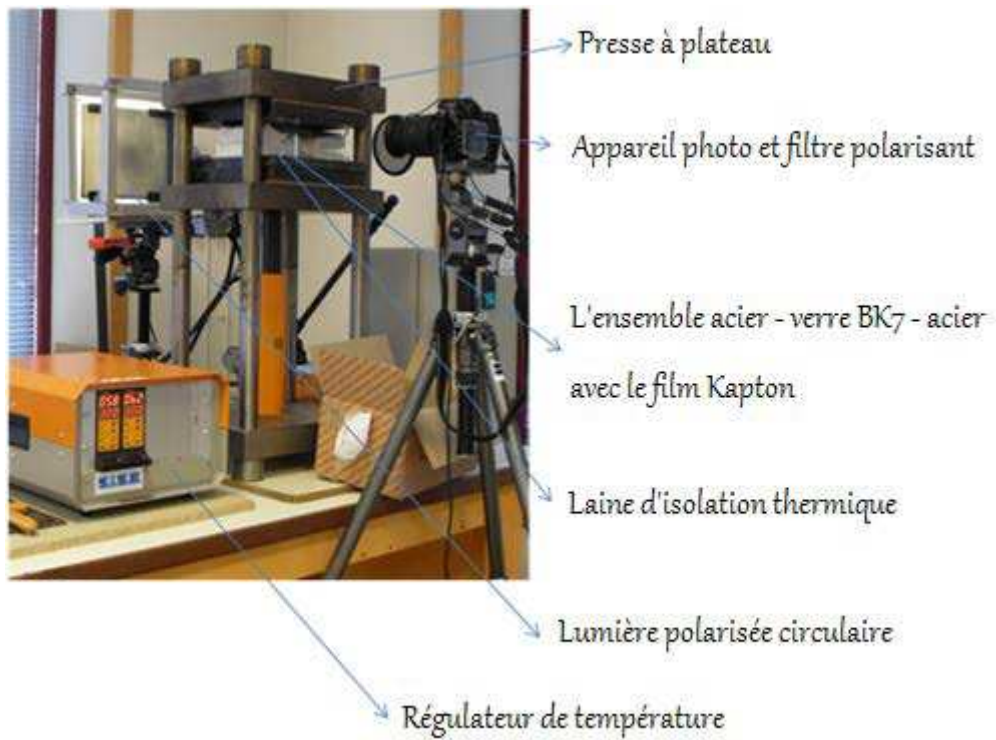


Figure 47 : Montage de test de chauffe et de refroidissement

➤ Résultats

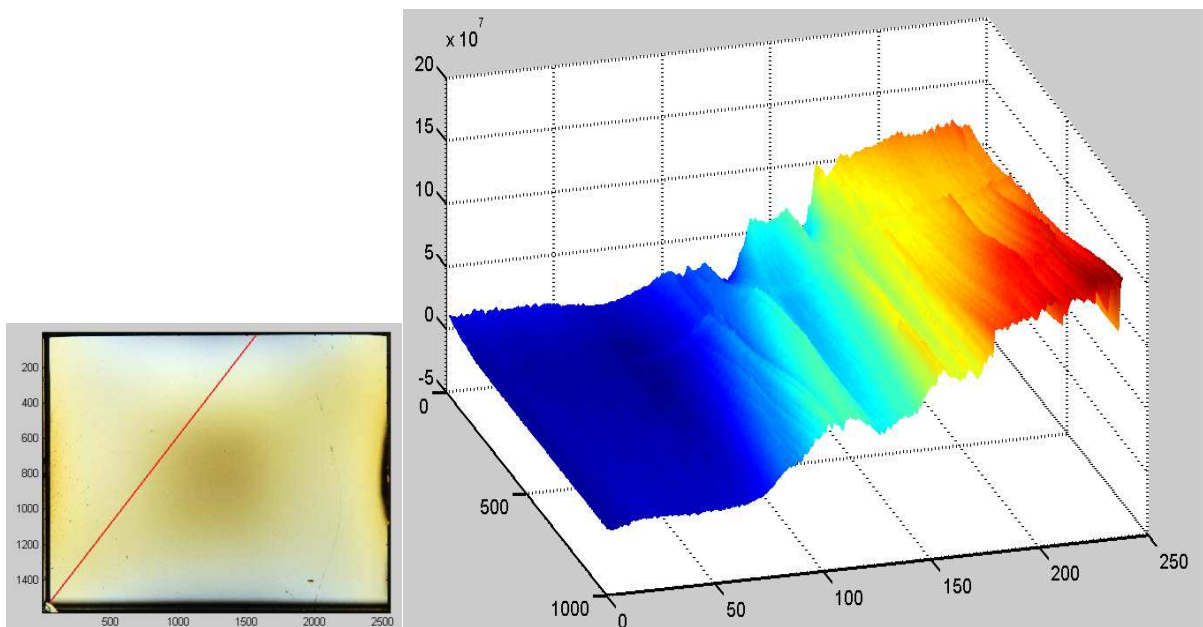


Figure 48 : Variation temporelle de la contrainte dans le verre (suivant la ligne rouge) en chauffe

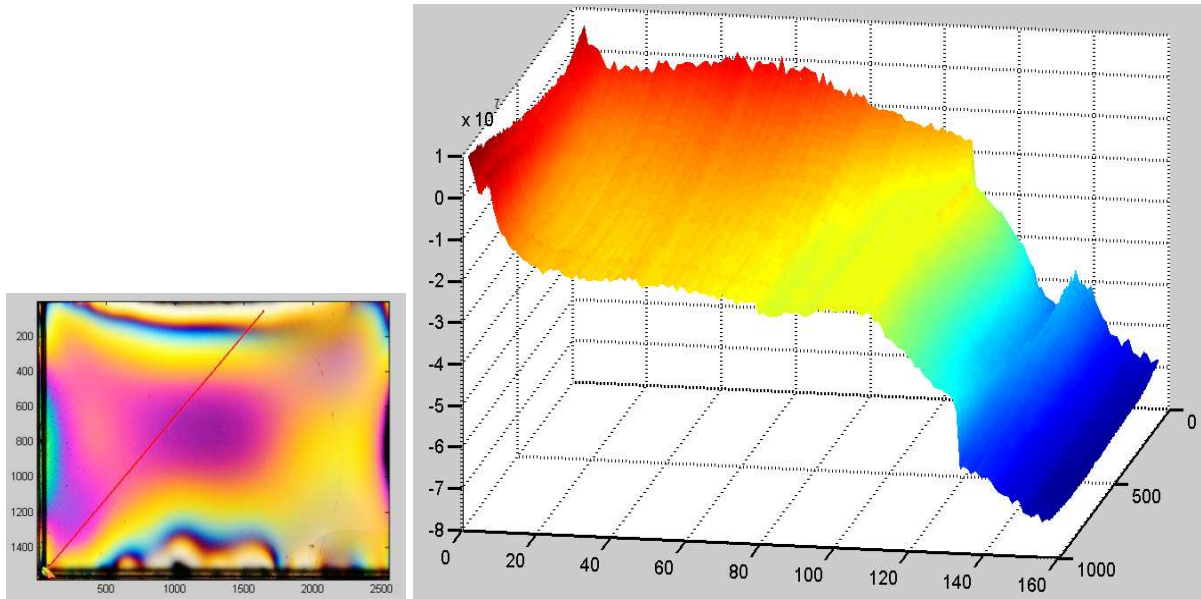


Figure 49 : Variation temporelle de la contrainte dans le verre (suivant la ligne rouge) au refroidissement

Toutes les photos sont regroupées pour faire deux vidéos d'animation des variations de contraintes en phase de chauffe et de refroidissement. Ils se trouvent dans le CD ci-joint avec le manuscrit. Nous pouvons constater qu'en phase de chauffe, les contraintes qui apparaissent dans le verre sont assez homogènes (Cf. Figure 48). En regardant la vidéo de cette phase, nous observons quelques points de concentration de contraintes qui sont créés quand les deux matériaux se dilatent ; il y a une légère pression entre le verre et l'acier. Ces points-là sont assez faibles et disparaissent au fur et à mesure que le verre atteint la température de l'acier, il n'y a donc pas de problème en phase de chauffe pour le système.

En phase de refroidissement, par manque d'attention de notre part, malgré la présence du régulateur de température, l'ensemble du système se refroidit par conduction pure à température ambiante. Nous constatons qu'il y a deux variations de contraintes très importantes au début de la phase, car l'acier prend assez rapidement la température d'ambiance et libère le verre tout de suite de la compression (Cf. Figure 49). De plus, les contraintes se libèrent de manière non linéaire dans le temps, la variation de contraintes peut casser la pièce en verre à n'importe quel moment. Il faut trouver une solution pour la phase de refroidissement du système afin de protéger les pièces en verre.

5 Les dernières modifications

Nous avons penser aux dilatations thermiques de manière verticale dans le verre BK7 et le fourreau en acier, d'où l'existence des différentes pièces expliquées précédemment. Par contre, horizontalement, l'ensemble se dilate. D'où une modification importante sur l'assemblage du fourreau est l'ajout de cales en dural. Celles-ci ont un rôle sur la dilatation entre l'acier et le verre.

D'après nos calculs de dilatation thermique suivant la fonction

$$y = k * \Delta T * l$$

avec

- k : le coefficient de dilatation thermique du matériau
- l : la longueur de la pièce
- ΔT : le gradient de température.

$$k_{\text{verre}} = 8,3 \times 10^{-6} ; k_{\text{acier}} = 12,1 \times 10^{-6}$$

Nous avons donc calculé la différence de dilatation thermique. Entre le fourreau en acier et la fenêtre en verre BK7, nous avons un grand écart de dilatation à partir de 100°C (Cf. Figure 50). Nous travaillons surtout avec des polymères dont la température de fusion est égale ou supérieure à 180°C. À 300°C, nous avons une différence de dilatation de 200 µm. Il existe donc sûrement un espace entre la fenêtre en verre et la partie en acier en travaillant avec les matières comme le polyéthylène (PE – à 190°C), ou bien le polypropylène (PP – à 230°C).

Pour éviter cet écart, nous décidons d'ajouter des pièces intercalaires entre le fourreau et la fenêtre. Ces pièces doivent être faites avec un matériau qui ait un coefficient de dilatation thermique assez important. Comme cela, nous pouvons créer des pièces intercalaires, dont l'épaisseur n'est pas trop importante, afin de ne pas prendre beaucoup de place lorsqu'on les ajoute à l'ensemble d'acier-verre.

Après plusieurs recherches, nous avons trouvé le dural (alliage d'aluminium) avec un coefficient $k_{\text{dural}} = 23 \times 10^{-6}$. En plus, le module de Young du dural approche celui du verre BK7 (Cf. Tableau 8). D'après notre calcul, nous diminuons de 200 µm à 60 µm le gradient de dilatation thermique entre le fourreau et l'ensemble verre-dural à 300 °C (Cf. Figure 51).

	Unité	Dural 7075
Module de Young	Pa	7,20E+04
Coefficient de Poisson		0,33
Masse volumique	kg/m3	2,71
Dilatation thermique	1/°C	2,30E-05
Résistance en traction	Pa	3,24E+05
Température de fusion	°C	638

Tableau 8: Propriétés mécaniques et thermiques du dural 7075.

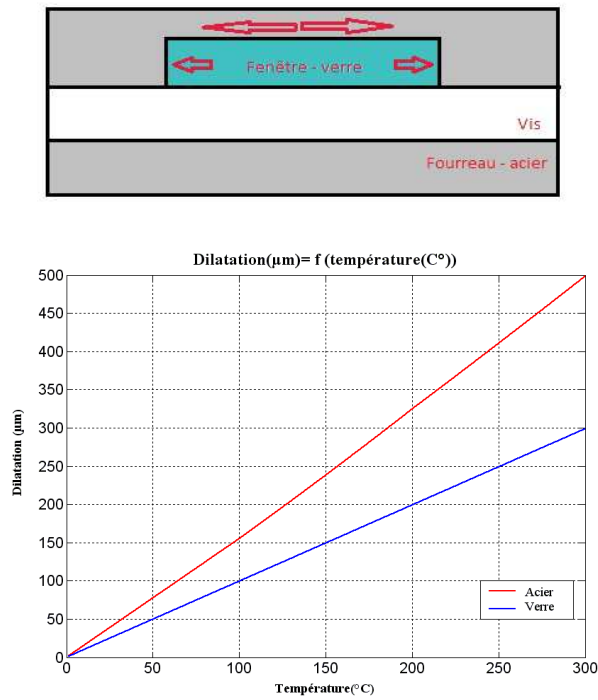


Figure 50 : Schéma explicatif de la dilatation horizontale du verre – fourreau et courbe de la dilatation de chaque matériau en fonction de la température

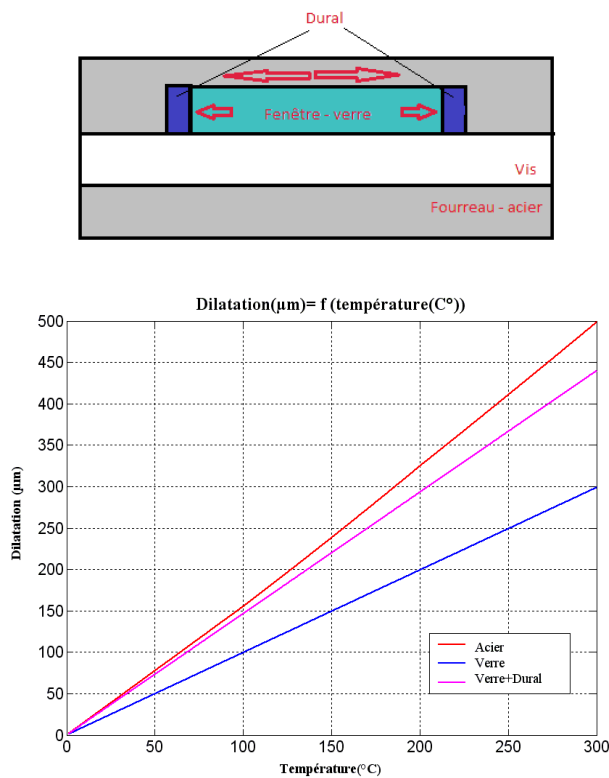


Figure 51: Schéma explicatif de la dilatation horizontale du verre – fourreau - dural et courbe de la dilatation de chaque matériau en fonction de la température

Entre le verre et le dural, il y a sûrement un écart une fois que l'ensemble du système est chauffé. Pour compenser cet espace, nous avons trouvé des joints en FFKM, Kalrez[®] 7075UP. Ce sont des joints toriques en élastomère, qui peuvent résister jusqu'à 327 °C. Ces joints ont des bonnes propriétés mécaniques, une stabilité thermique parfaite et offrent une excellente propriété en compression. Ils sont utilisés souvent pour les applications d'étanchéité statiques et dynamiques. Tableau 9 présente les caractéristiques techniques de ce joint.

	Unité	
Dureté (plage 70 - 80)	Shore A ± 5	75
Module à 100 % (ASTM D412, 500 mm/min)	MPa	7,6
Résistance à la rupture	MPa	17,9
Allongement à la rupture	%	160
Déformation rémanente après compression, 70h à 204°C	%	12
Température maximale en service	°C	327
Température minimale en service	°C	-20

Tableau 9: Caractéristiques techniques du joint torique en FFKM Kalrez[®] 7075UP

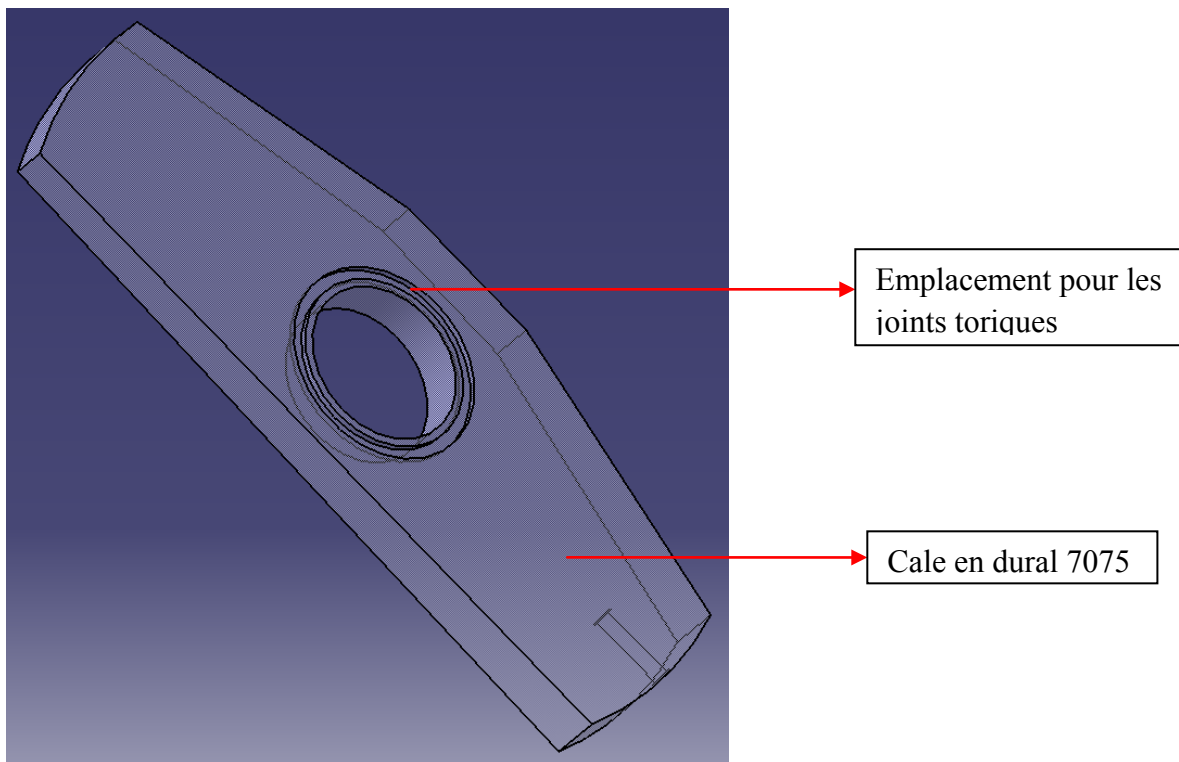


Figure 52: Emplacement des joints sur les cales en dural 7075

L'ajout de ces deux plaques en dural (alliage aluminium) et ces joints toriques, comme indique la Figure 52, nous permet donc de limiter les fuites de matière durant l'injection. Ainsi, la Figure 53 indique un plan de couple de l'assemblage avec la présence de ces cales.

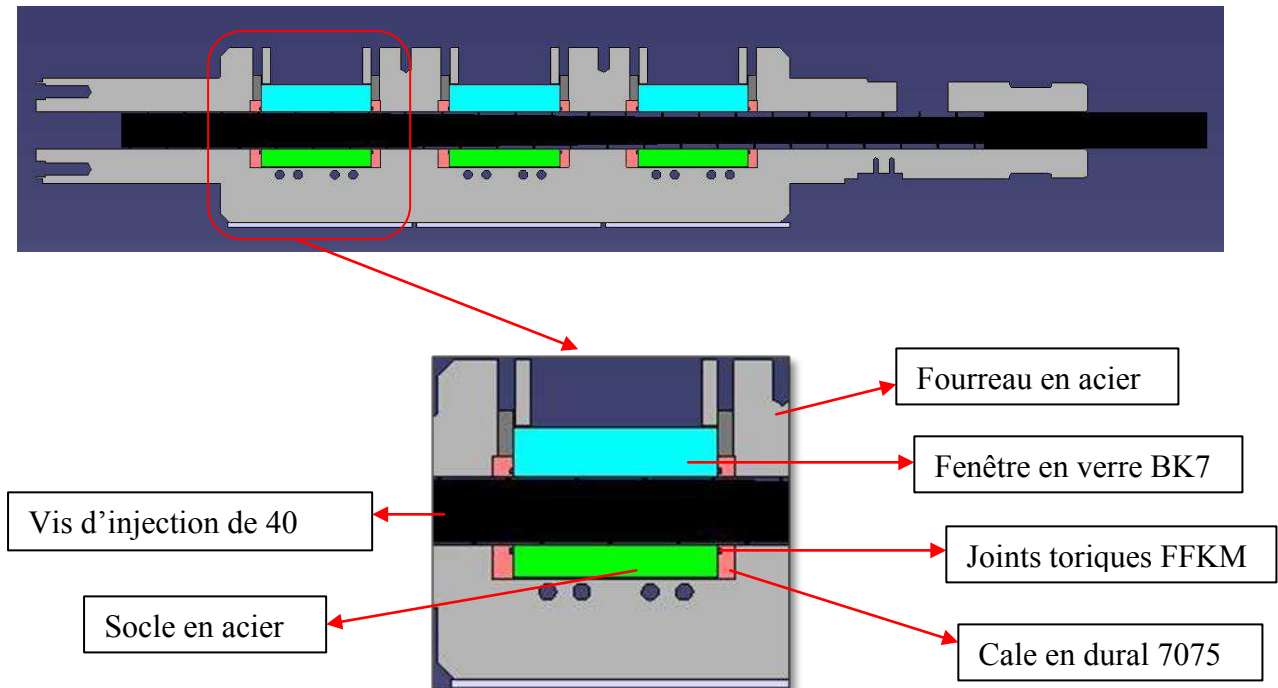


Figure 53: Plan de coupe de l'assemblage du système vis-fourreau à fenêtre suivant l'axe de la vis, et extrait d'une partie contenant la fenêtre transparente

Un autre point à prendre en compte concerne le montage de l'ensemble des pièces. Les cales en dural servent à serrer l'ensemble socle – joints – fenêtres en verre dans leurs emplacements dans le fourreau à fenêtre. Il faut donc une astuce pour faciliter le montage de ces cales. C'est pour cette raison que, pour un couple de cales en alliage aluminium, l'une d'entre elles va être usinée avec une face légèrement inclinée de $1,5^\circ$. Cette pente nous permettra de glisser plus facilement la cale dans l'espace qui lui est réservée afin de serrer et fixer tout l'assemblage en place. Elle facilite aussi le démontage de l'ensemble.

6 Assemblage total final

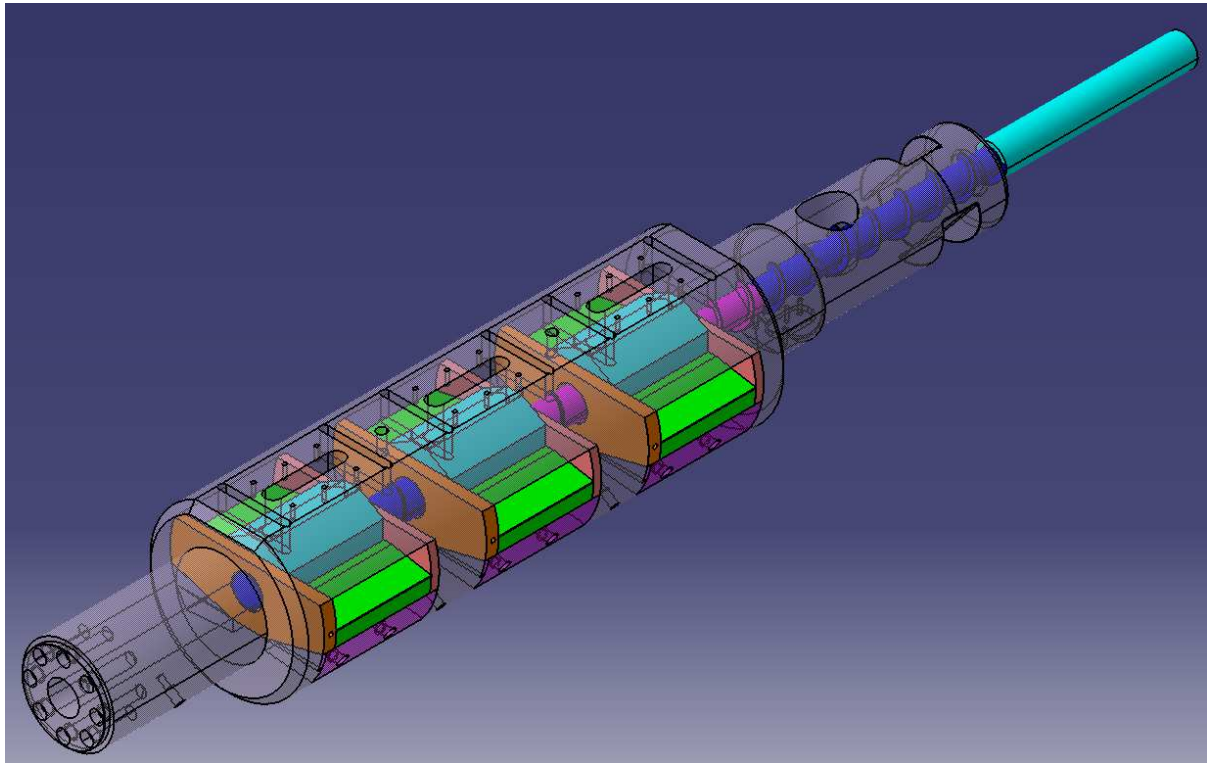


Figure 54: Assemblage final en CAO du système fourreau à fenêtres sans les colliers chauffants

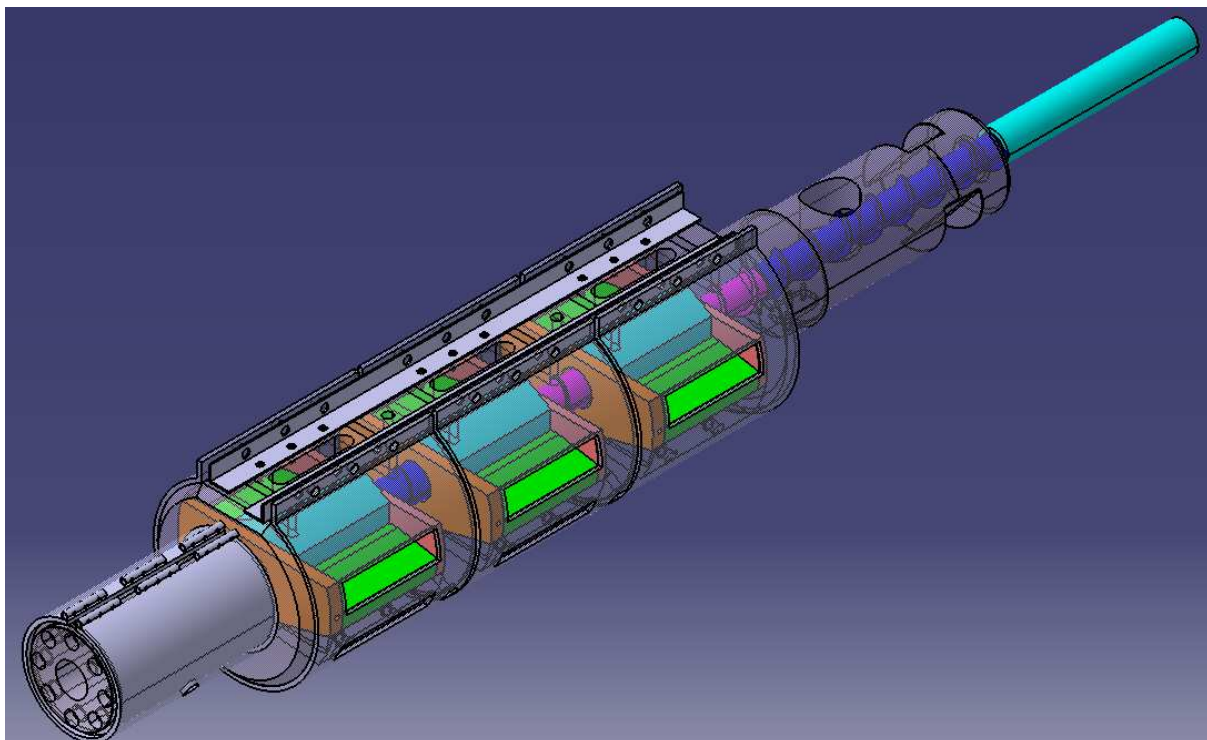


Figure 55: Assemblage final en CAO du système fourreau à fenêtres avec les colliers chauffants