

Une fois la conception de l'ensemble du fourreau à fenêtres sur l'ordinateur terminé, et que les résultats des calculs par simulation numérique sont au niveau de nos attentes, nous cherchons des entreprises qui puissent réaliser nos pièces spéciales, ainsi que les méthodes d'usinage. Nous prenons conscience de la difficulté de réaliser l'ensemble des pièces. Peu de sociétés ont la capacité de fabriquer des pièces avec une matière spécifique (comme le verre BK7), et avec beaucoup de précision et d'exigence de qualité finale. Nous privilégions les usines en France pour les pièces en verre BK7. Pour toutes les pièces en acier, le fourreau principal et les pièces intercalaires, nous avons trouvé une entreprise très près de notre laboratoire. De ce fait, nous avons plus de facilité pour enchaîner les rencontres, les discussions, ainsi que les échanges des savoirs faire et des expériences, pour pouvoir atteindre notre objectif final : **réaliser notre fourreau à fenêtres.**

Dans ce chapitre, nous présentons la phase d'usinage des différentes pièces de notre dispositif "fourreau transparent", quelques informations sur nos fabricants, ainsi que leurs méthodes spécifiques d'usinage.

1 L'usinage du verre BK7

L'usinage de la pièce en verre est fait de manière purement traditionnelle, mais reste un secret de fabrication chez notre fournisseur de verre (Cf. Figure 56). Ayant visité l'entreprise TRANSLUX et leur chaîne de fabrication, et rencontré tous les personnels travaillant dans cette société, nous avons totalement confiance en leur compétence dans le domaine très spécial du verre optique.

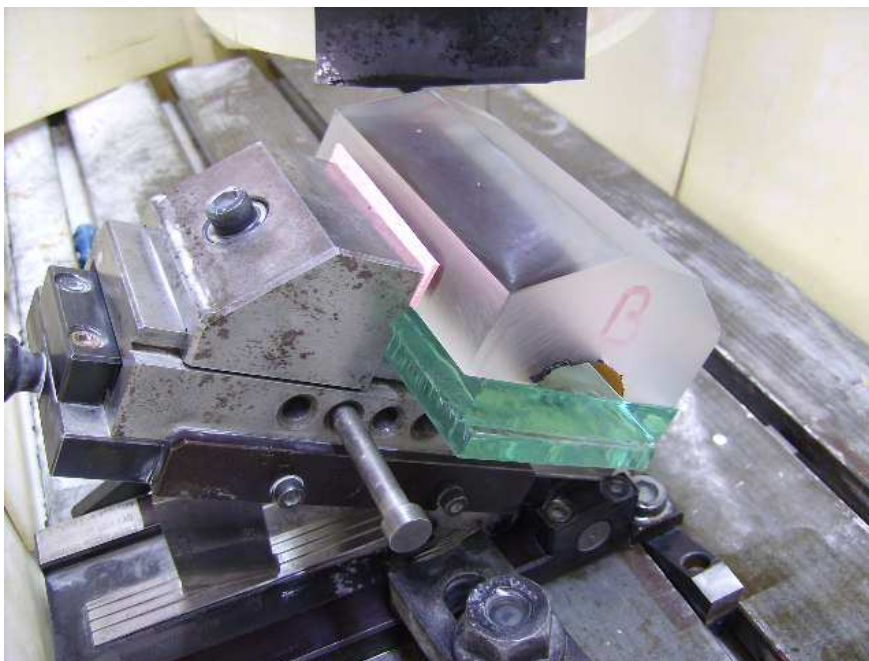


Figure 56: Photo de la pièce en verre en fin de fabrication (photo fournie par TRANSLUX – fabricant des pièces en verre spécial)

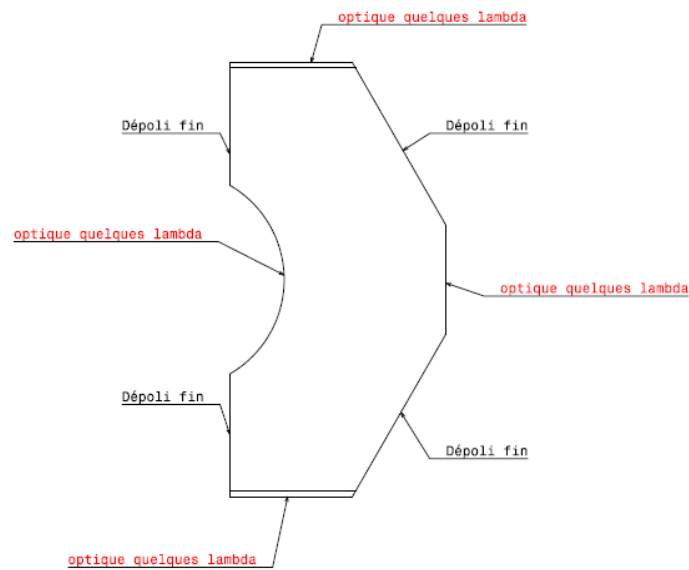


Figure 57 : Exigences demandées pour les pièces en verre BK7

Nous avons eu des exigences envers notre fournisseur de verre concernant les usinages des pièces : les surfaces qui sont en contact avec le fourreau en acier doivent être surfacées en "**dépolies fin**", et les autres faces doivent assurer une propriété optique excellente, d'où la demande d'un "**poli-optique**".

✓ Poli optique :

Le poli optique est un état de surface utilisée spécialement dans les domaines de fabrications des verres à lentilles qui résulte en une surface parfaitement lisse, transparente et sans déformation. Cet état de surface apporte aux pièces en verre de meilleures propriétés mécaniques, comme par exemple : la résistance à l'usure, et la résistance aux rayures.



Figure 58 : Fenêtre en verre BK7 usinée

Elle permet surtout d'avoir une transparence parfaite de nos pièces en verre, sans créer de déformations des objets que l'on regarde à travers du verre. L'inconvénient de cette technique est le temps et le coût. Seule la surface cylindrique (où traverse la vis d'injection) et les trois surfaces planes pour l'accès des caméras et de lumière doivent être transparentes.

Nous avons testé la transparence en plaçant un article au-dessous de notre fenêtre. En regardant à travers la pièce, nous obtenons parfaitement les informations présentes derrière la pièce. En plaçant un appareil photo perpendiculaire à la pièce, verticalement et horizontalement, nous constatons qu'il n'y a aucune déformations des images. La courbure de diamètre Φ 40 mm ne pose aucun problème de visualisation. (Cf. Figure 59)

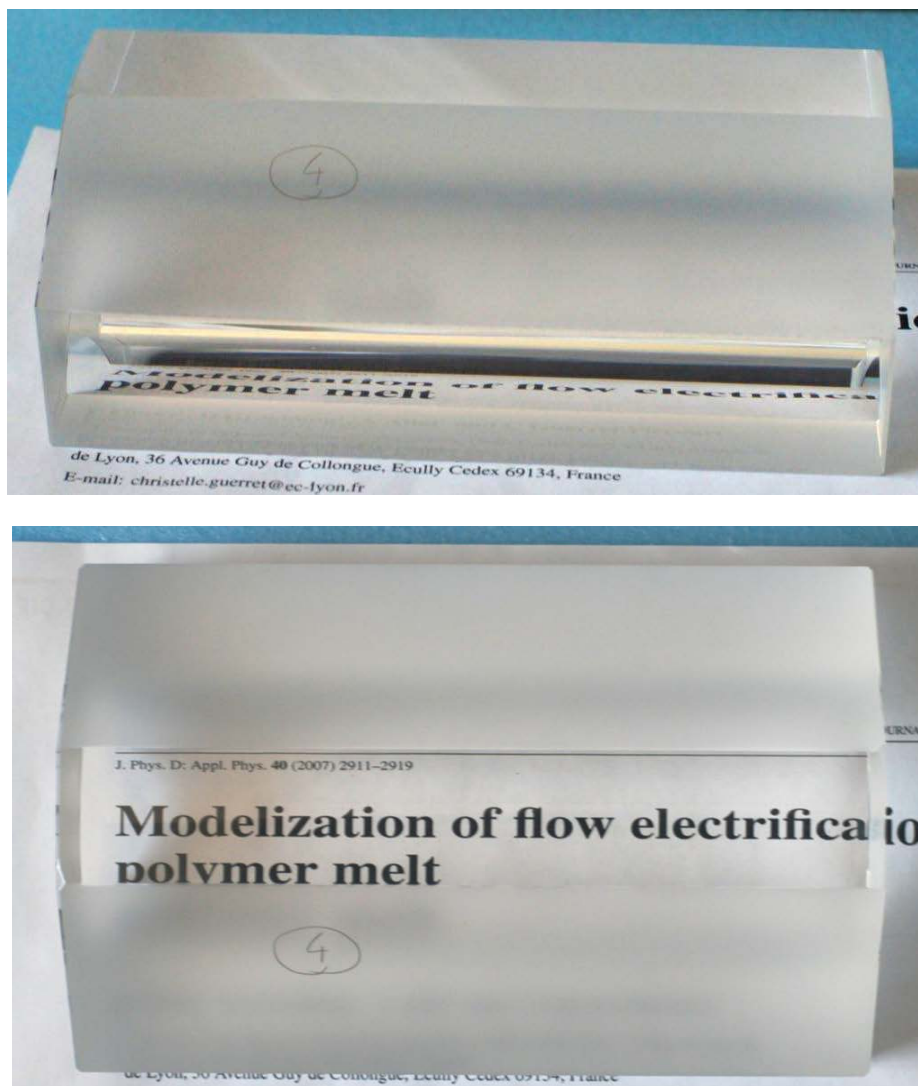


Figure 59 : Test de transparence des surfaces usinées de la fenêtre en verre BK7 par la méthode de poli optique – il n'y a pas de déformation des images à travers le verre

✓ Dépoli fin

Le dépoli fin ne permet pas d'avoir une surface transparente comme par la méthode poli optique, mais on obtient une surface avec l'état de surface lisse, et des propriétés mécaniques qui sont très proches de celles créées par la méthode du poli optique. D'après le fabricant du verre BK7, Schott, on a la même résistance à l'usure et la même résistance aux rayures que les autres surfaces qui sont polies optiques. (Schott – Technical Glass Guide [21]). De plus, en utilisant cette technique, nous gagnerons en temps et en coût de réalisation des pièces, car nous n'avons pas besoin d'un niveau de transparence parfait pour les surfaces de nos pièces en verre qui sont en appui sur l'acier.

2 L'usinage du fourreau principal

D'après les simulations numériques, les surfaces de contact entre le verre et l'acier doivent être parfaitement glissantes pour assurer les résultats calculés. Les surfaces de l'acier qui sont en contact avec le verre doivent être bien lisses. Pour avoir le meilleur aspect de surface sur l'acier, les procédés d'usinage normaux, comme par exemple le fraisage, ou même le polissage, ne donnent pas des résultats conformes à nos attentes. En plus, l'emplacement du verre est à l'intérieur du fourreau, et nous avons besoin de la plus grande précision, il nous faut donc un procédé spécifique.

Après plusieurs recherches, plusieurs consultations, notamment notre fournisseur : Billion – fabricant des presses à injecter, nous avons trouvé le procédé d'usinage qui peut répondre à nos exigences : l'électroérosion.

2.1 Méthode d'usinage

On choisit l'électroérosion pour pouvoir obtenir un meilleur état de surface pour le contact entre le verre et l'acier. En plus de cela, cette méthode d'usinage nous permettra d'usiner notre fourreau avec la plus grande précision possible.

L'électroérosion est la technique employée par l'industrie afin de pouvoir usiner avec la plus grande précision toutes sortes de matériaux conducteurs (métaux, alliages, graphites, céramiques, etc.), quelle que soit leur dureté.

Cette technique procède par fusion, vaporisation et éjection de la matière. L'énergie est apportée par des décharges électriques passant entre deux électrodes, la pièce et l'outil. Quatre éléments sont nécessaires pour ce procédé :

- *Une électrode : peut être faite en cuivre et ses alliages, en tungstène et ses alliages, ou bien en graphite. La qualité des matériaux retenue pour l'électrode décide de la qualité de la surface usinée.*
- *Une pièce : en tout type de matériaux conducteurs*
- *Un diélectrique : en général un liquide isolant (des hydrocarbures, des huiles minérales, des produits de synthèse, des solutions aqueuses, ou de l'eau dé-ionisée)*

- De l'électricité : pour l'alimentation des électrodes

Cette technique modifie les caractéristiques de la matière en surface et en sous-couche. La surface usinée est faite de cratères, sa rugosité (R_a) est grossière en ébauche ($R_a = 10$ à $30 \mu\text{m}$); puis bonne en finition ($R_a = 0,4$ à $1,6 \mu\text{m}$). Ce ne peut pas être une technique de grande série. Les outils s'usent pendant le procédé à cause de la décharge passant par les deux électrodes et l'enlèvement de matière sur l'outil. Sa grande qualité est la précision, qui peut être meilleure que $0,01 \text{ mm}$ à condition de maîtriser l'usure de l'outil. Par contre, les vitesses d'usinage ne sont pas très élevées, entre $0,2$ à 10 mm / min .

Il y a trois types d'électroérosion :

- L'électroérosion par enfonçage dans laquelle une électrode de forme complémentaire à la forme à usiner s'enfonce dans la pièce
- L'électroérosion par fil, où un fil conducteur animé d'un mouvement plan et angulaire découpe une pièce suivant une surface réglée
- Le perçage rapide utilise une électrode tubulaire pour percer les matériaux très durs.

L'électroérosion est utilisée dans plusieurs secteurs l'industrie : les outillages des procédés de transformation de matière plastique (les moules complexes, les poinçons, les filières ...), dans l'aéronautique, dans l'automobile, ou bien dans le domaine nucléaire et médical. Elle est incontournable pour réaliser des formes complexes dans des matériaux à hautes caractéristiques mécaniques. [22]



Figure 60: Exemple d'un bac d'une machine d'usinage en électroérosion

En général, les pièces à usiner sont trempées dans le bac contenant les liquides diélectriques. La pièce usinée a donc une taille inférieure à celle du bac de liquide. Dans notre cas, il nous faut donc un bac qui fasse plus d'un mètre de longueur pour que le fourreau puisse être trempé dedans. Il n'y a pas beaucoup d'entreprises d'usinage qui ont une machine

d'électroérosion dont le bac soit de cette taille. Nous avons ciblé différentes usines de fabrication de moules. Heureusement, très près de notre laboratoire au site de plasturgie Bellignat, nous avons trouvé la société Compose Tooling Experts, qui fabrique généralement des moules de très grande taille, et qui travaille avec le procédé d'électroérosion de la taille que nous attendons. En présentant notre projet innovant et en étudiant ensemble le plan du fourreau, ainsi que toutes les possibilités de fabrication et les difficultés, la société a accepté de nous fabriquer ce fourreau unique au monde.

Compose Tooling Experts (Composetools - anciennement Cogemoule)

<https://www.compose-tools.com>

Le siège social de la société est situé au 8 rue de la gare, 01810 Bellignat. C'est aussi un centre de production, et de recherche et développement. Elle a été créée en 1967, avec un effectif de 85 personnes. Les domaines d'activité principaux sont :

- *Conception et industrialisation de pièces composites et plastiques*
- *Conception et fabrication d'outillage de toutes dimensions jusqu'à 60 mètre de long et 135 tonnes en poids pour les diverses technologies: RTM, estampage PEEK & PPS, injection thermoplastique, injection – compression, SMC, drapage, enroulement filamentaire, élastomère.*

Une surface de production de 5000 m² disposant d'un important parc de machine comprend 37 machines traditionnelles et CNC, avec des unités d'usinage principales :

- *Fraisage*
- *Tournage*
- *Forage*
- *Rectification*
- *Electroérosion*
- *Contrôle*

L'entreprise se lance actuellement dans plusieurs domaines d'activité du marché : comme l'automobiles, l'aéronautique, la construction, le ferroviaire, les sports, l'énergie, etc.

2.2 Des exigences au niveau de l'état de surface

Même si nous savons que nous pouvons faire confiance aux résultats de la simulation numérique, les calculs avec des conditions imposées présentent quand même des conditions aux limites qui ne sont pas tout à fait identique à la réalité. Dans nos calculs, nous avons considéré que toutes les surfaces de contact sont des contacts glissants, ceux qui éliminent le maximum de concentrations de contraintes. Alors que les surfaces complètement lisses sont très difficiles à obtenir, et que les contacts entre les surfaces rugueuses vont créer sûrement des points de concentration de contraintes.

Nous exigeons auprès de notre fabricant des surfaces parfaitement lisses. Comme expliqué auparavant, pour les fenêtres en verre, les surfaces sont faites avec le procédé de dépoli fin, ce

qui permet de créer le meilleur aspect des surface pour l'usinage du verre BK7. Pour le fourreau en acier, on exige une surface usinée de l'acier avec la rugosité la plus faible possible.

Notre fabricant, Compositools, utilise le procédé d'électroérosion par enfonçage pour usiner les emplacements des fenêtres en verre. Les électrodes de finition en graphite décident de l'état de surface de notre acier. La gamme d'électrodes est déterminée et publiée par AgieCharmilles, ce qui donne différents états de surfaces comme montrés dans la Figure 61. A l'œil nu, nous avons fixé la plage des états de surface que l'on voudrait (souhaiterait) pour les emplacements du verre. À partir du numéro 27, ce qui correspond à la rugosité $Ra = 2,20 \mu\text{m}$, les états de surface sont très rugueux, on essaie donc d'éviter cela. Toutes les surfaces correspondent avec les numéros 0 ($Ra = 0,1 \mu\text{m}$), 3 ($Ra = 0,15 \mu\text{m}$), 6 ($Ra = 0,20 \mu\text{m}$), 9 ($Ra = 0,30 \mu\text{m}$), 12 ($Ra = 0,40 \mu\text{m}$) sont vraiment très lisses, mais le temps d'usinage va être prohibitif pour pouvoir obtenir cette texture sur les trois emplacements des fenêtres en verre. Compositools nous annonce en même temps que c'est impossible à faire dans leur atelier, et en plus, notre budget ne nous le permet pas. Nous tentons donc la plage des numéros 12 ($Ra = 0,40 \mu\text{m}$), 15 ($Ra = 0,55 \mu\text{m}$), 18 ($Ra = 0,80 \mu\text{m}$), 21 ($Ra = 1,10 \mu\text{m}$), 24 ($Ra = 1,60 \mu\text{m}$).

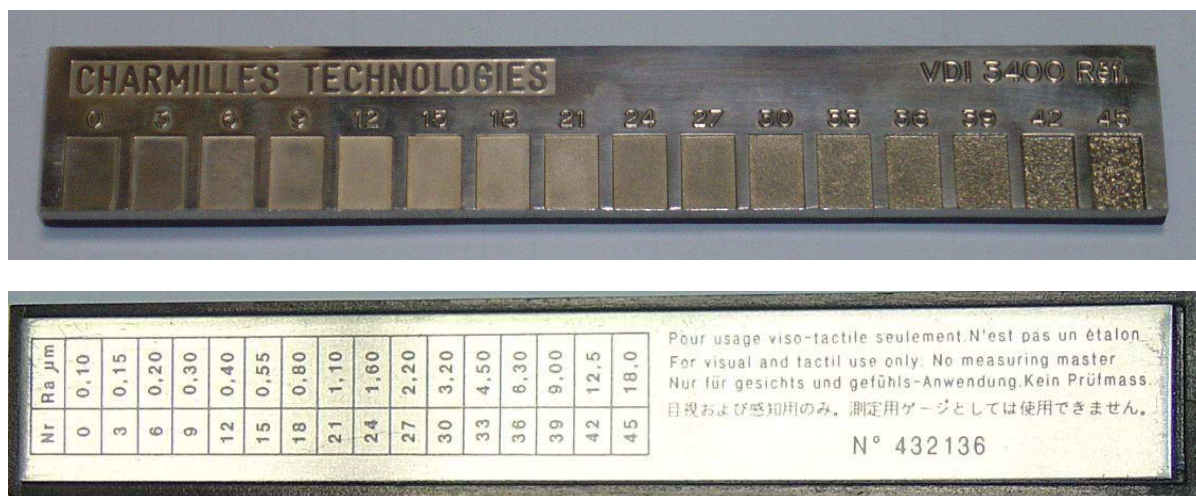


Figure 61 : Gamme des états de surfaces usinées par le procédé électroérosion en utilisant les électrodes en graphite.

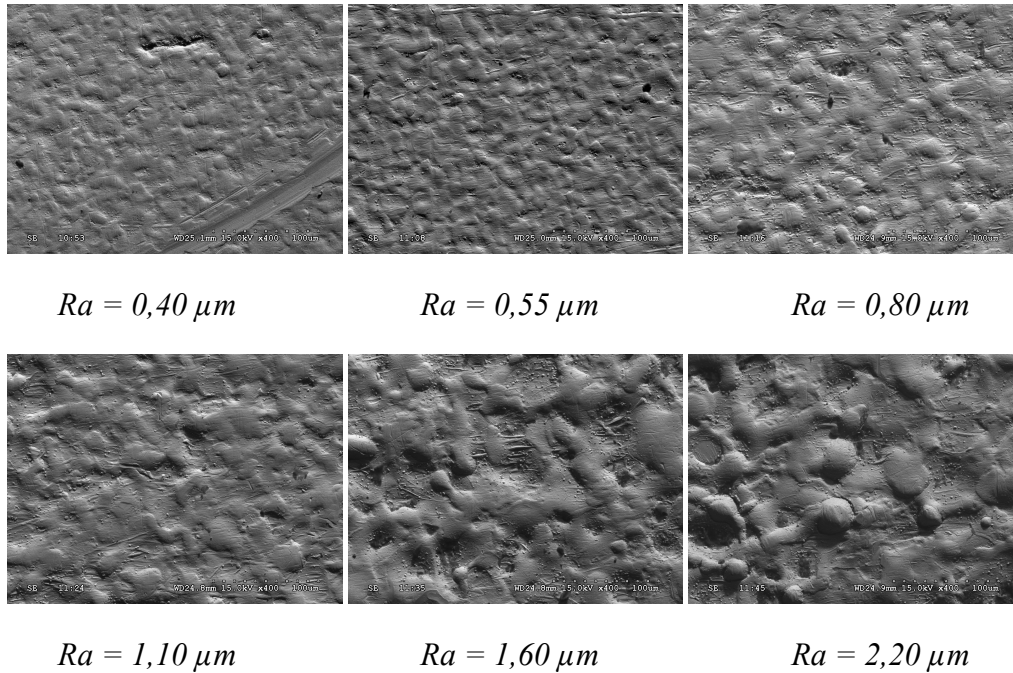
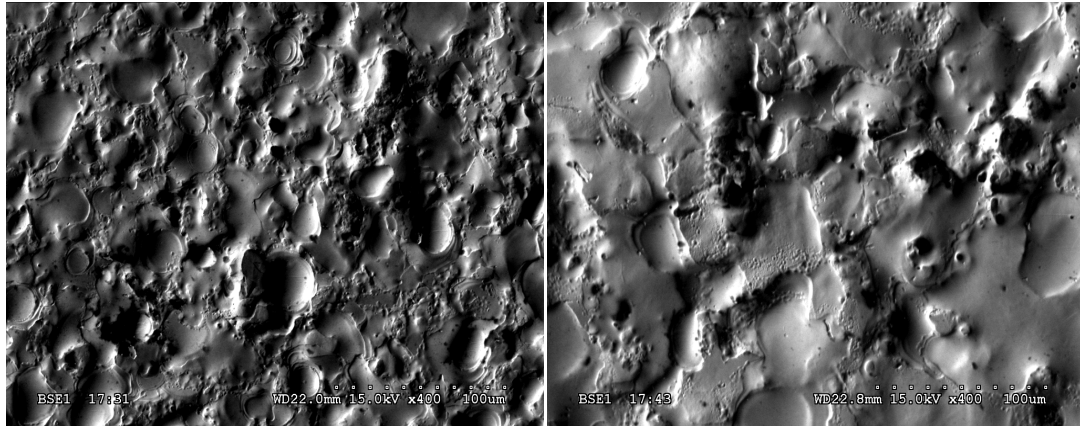


Figure 62: Échantillons de l'état de surface obtenu par usinage par électroérosion suivant Charmilles (avec des différentes rugosités Ra) et observés par microscopie électronique à balayage (MEB) – grossissement 400 fois

Nous décidons d'observer ces surfaces de plus près à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB), ce qui nous permet d'avoir des grossissements un peu plus importants qu'un microscope optique. Avec le même grossissement à 400 fois, nous pouvons constater que les surfaces avec la rugosité inférieure à $1 \mu m$ sont vraiment très lisses, nous ne détectons pratiquement aucun trou n'est présent en balayant toute la surface d'échantillon (de taille $10 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$). Par contre, en plus de la difficulté et du temps qu'il faut passer pour usiner ces types de surfaces, notre budget est limité. Nous devrions donc envisager d'avoir des surfaces usinées avec des états de surface un peu plus rugueux.

Pour être sûr de nos choix, nous passons par l'étape intermédiaire qui consiste à tester le contact surface entre le verre BK7 et l'acier usiné sur un échantillon du même acier 41CrAlMo7.10TR et électro-érodé. Nous avons donc demandé auprès de Composetools un échantillon représentant les meilleurs états de surface qu'ils peuvent réaliser avec le procédé électroérosion. Nous avons observé comment se présentent ces échantillons par la microscopie électronique à balayage (MEB). La Figure 63 indique les deux états de surface que notre fabricant peut faire couramment (Figure 63 (a)) et avec beaucoup d'amélioration (Figure 63 (b)).

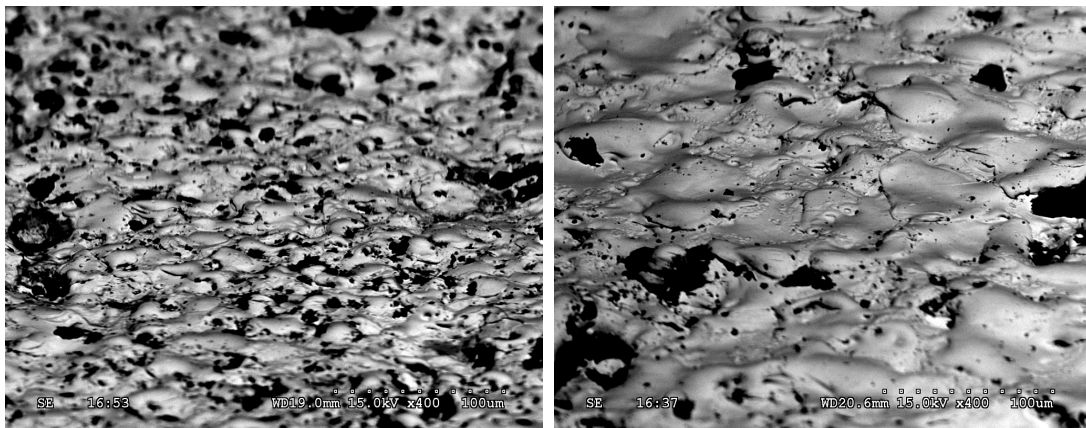


(a)

(b)

Figure 63 : Observation par MEB des états de surfaces en acier usiné par électroérosion chez Compositools (grossissement : 400 fois):

(a) Etat de surface courant ($Ra = 3,15 \mu\text{m}$) ; (b) état de surface amélioré ($Ra = 1,12 \mu\text{m}$)



(a)

(b)

Figure 64: Observation par MEB des états de surfaces en acier usiné par électroérosion chez Compositools (grossissement : 400 fois) en inclinant l'échantillon de 60° :

(a) État de surface courant ($Ra = 3,15 \mu\text{m}$) ; (b) état de surface amélioré ($Ra = 1,12 \mu\text{m}$)
Les profondeurs maximums des trous dans les deux cas sont de l'ordre de $20 \mu\text{m}$

L'observation avec le MEB, avec le grossissement de 400 fois, nous montre qu'en améliorant le maximum possible, la surface usinée en acier devient beaucoup plus lisse, mais elle présente quand même une certaine valeur de rugosité. Les valeurs de rugosité sont données par la société Compositools. En comparaison avec des échantillons Charmilles présentés précédemment, nous confirmons la valeur de rugosité de la surface usinée. Nous constatons quand même qu'il y a des trous plus profonds qui sont présents sur la surface. La mesure en inclinant la pièce de test à 60° nous donne la profondeur maximum de $20 \mu\text{m}$ (Cf. Figure 64 (a) et (b)). Les trous de cette profondeur sont peu nombreux sur la totalité de la surface, mais

ils sont des acteurs essentiels qui créent des points de concentration de contraintes au contact de la surface en verre. Vue la limite du procédé chez notre fabricant, et vue la limite de notre budget total, nous acceptons l'état de surface avec la valeur de rugosité à $1.12 \mu\text{m}$. Et en attendant l'usinage de la pièce, nous avons essayé de trouver une solution pour pouvoir éviter les contraintes dans la fenêtre.

Une des solutions retenues est d'ajouter une cale entre ces deux surfaces acier – verre. Ce calage, en plus d'une épaisseur très fine, doit supporter des conditions de température dans le système vis-fourreau du procédé injection moulage, à savoir 250°C au minimum, et idéalement plus de 300°C .

Afin de pouvoir diminuer les points de concentration de contraintes au contact entre deux surfaces verre BK7 – acier électro-érodé, nous avons cherché et choisis le film Kapton® de Dupont.

Quelques mots sur le film Kapton® de Dupont :

Le film de Kapton de Dupont a plus de 35 ans d'utilisation prouvée comme matériel flexible de choix dans les applications impliquant des températures extrêmement hautes (400°C), ou basses (-270°C). Le film de polyimide de Kapton est employé dans une large variété d'applications telles que des substrats pour les circuits imprimés, l'isolation de transformateur et de condensateur et les étiquettes flexibles de code-barres. Le Kapton est également employé pour les bandes de fil et de câble, l'isolation formée d'enroulement, les revêtements de fente de moteur, l'isolation de fil d'aimant, l'isolation de transformateur et de condensateur, les bandes magnétiques et sensibles à la pression, et la tuyauterie

Nous avons monté un test de contact entre l'acier et le verre avec une machine de traction. Le montage est présenté sur la Figure 65. Le test est réalisé à température ambiante, l'ensemble des pièces est éclairé par une lumière polarisée circulaire et l'observation est faite avec l'œil nu et un appareil photo numérique à travers un filtre polarisant circulaire, pour mettre en évidence la présence de contraintes par la méthode de photoélasticimétrie. L'ensemble des pièces de test comprend une pièce en verre BK7 de taille $76.2 \text{ mm} \times 76.2 \text{ mm} \times 12,7 \text{ mm}$ (donc $12,7 \text{ mm}$ d'épaisseur) posée sur l'échantillon électro-érodé. Pour éviter que le poinçon de la machine appuie directement sur la surface du verre, nous utilisons une barre en acier, avec la surface plus large que le verre et le poinçon. Nous réaliserons plusieurs tests :

- Verre – Acier surface normale ($R_a = 3,15 \mu\text{m}$)
- Verre – Acier surface améliorée ($R_a = 1,12 \mu\text{m}$)
- Verre – Kapton de $25 \mu\text{m}$ - Acier surface normale ($R_a = 3,15 \mu\text{m}$)
- Verre – Kapton de $25 \mu\text{m}$ - Acier surface améliorée ($R_a = 1,12 \mu\text{m}$)
- Verre – Kapton de $75 \mu\text{m}$ - Acier surface normale ($R_a = 3,15 \mu\text{m}$)
- Verre – Kapton de $75 \mu\text{m}$ - Acier surface améliorée ($R_a = 1,12 \mu\text{m}$)

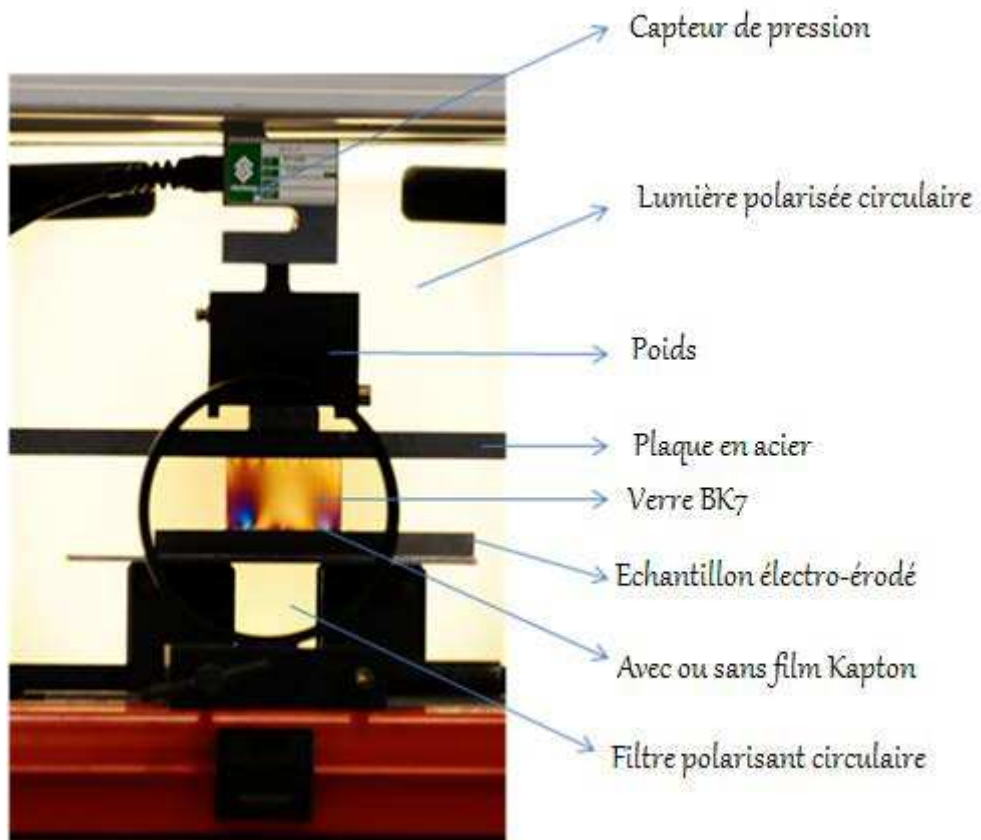
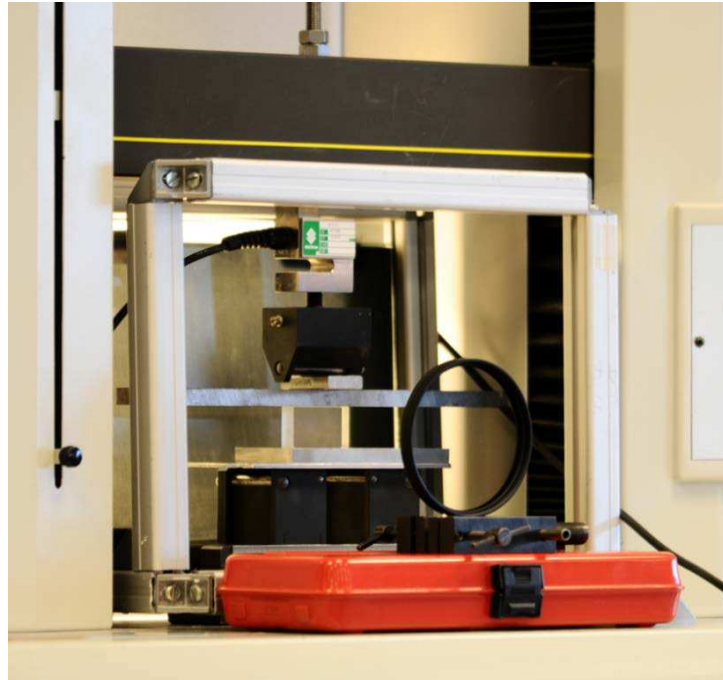
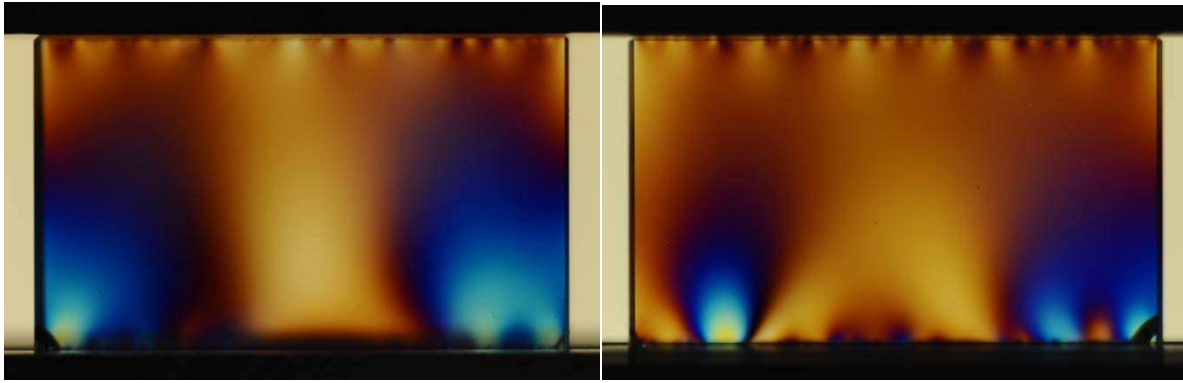
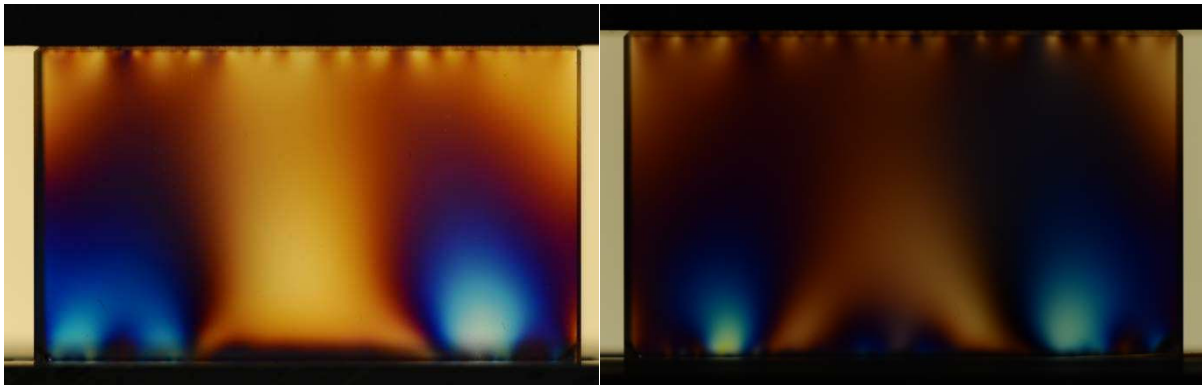


Figure 65 : Montage du test de compression à température ambiante



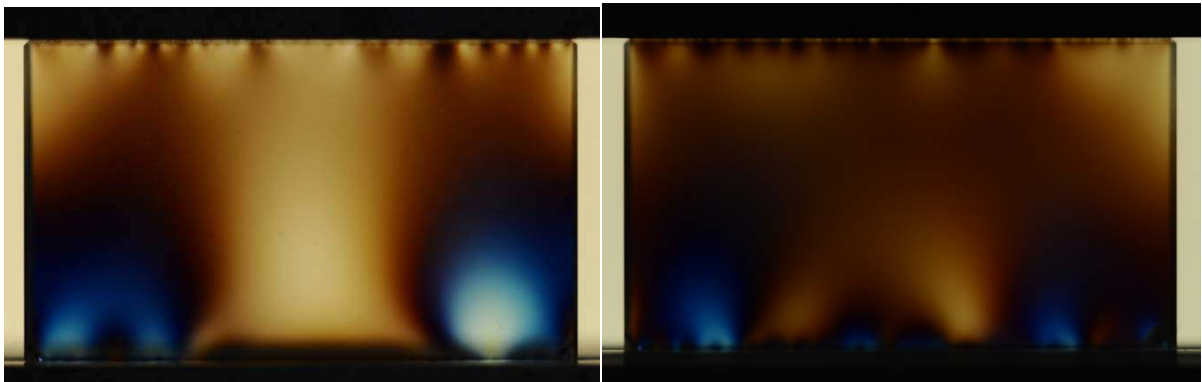
(a) Surface normale

(b) Surface optimisée



(a1) Surface normale avec Kapton 25 μm

(b1) Surface optimisée avec Kapton 25 μm



(a2) Surface normale avec Kapton 75 μm

(b2) Surface optimisée avec Kapton 75 μm

Figure 66: Concentration de contraintes au contact surface entre le verre BK7 et les deux surfaces usinées par électroérosion de l'échantillon en acier, avec ou sans la présence du film Kapton®, force exercée 4000 N.

Les résultats de photoélasticimétrie nous montrent des points de concentration de contrainte apparaissant dans le verre quand on applique la pression, avec plus ou moins d'intensité. Nous pouvons constater que, avec la surface améliorée en usinage d'électroérosion ($R_a = 1,12 \mu\text{m}$), l'intensité des points de concentration de contraintes est beaucoup diminuée par rapport à la surface normale (Cf. Figure 66: (a) et (b))

Par contre, avec le film Kapton® le plus épais, les points de concentration de contraintes ont diminué un peu en intensité, s'ils n'ont pas disparu totalement. Le risque de laisser ces points présents dans le verre est de réduire la résistance de la pièce, avec le risque qu'elle se casse. C'est pour cela, nous cherchons à libérer au maximum les contraintes dans notre pièce en verre BK7.

L'utilisation des films en Kapton® n'est donc pas la solution retenue. Mais en observant bien toutes les photos prises lors de l'expérience, nous constatons qu'il n'y a pas de points de concentration de contrainte entre le verre et la barre en acier (extrait Cf. Figure 67). Cette observation nous donne l'idée de chercher une surface en acier très lisse, pour que nous puissions avoir un contact sans risque.

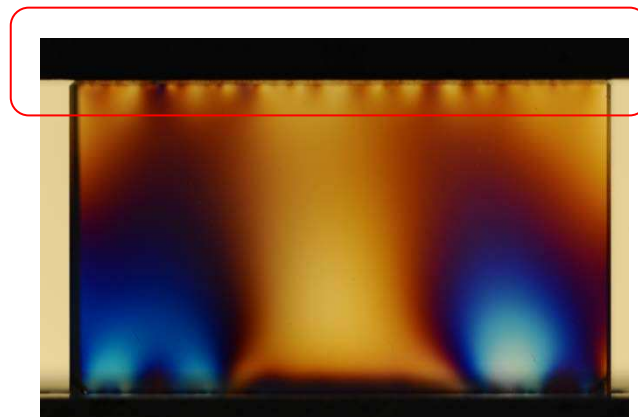


Figure 67 : Extrait du contact surface entre la barre en acier lisse et la pièce en verre BK7

Il existe dans l'industrie des feuilles en acier avec un état de surface parfaitement lisse, des clinquants en acier. Ces feuilles servent à faire des calages de précision dans différents domaines.

Nous avons refait le test montré précédemment, mais nous avons remplacé le film en Kapton® par les films de clinquant de différentes épaisseurs : $25 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ et $100 \mu\text{m}$. On a augmenté la force exercée à 6000N . Le test s'est réalisé à température ambiante avec la machine de traction.

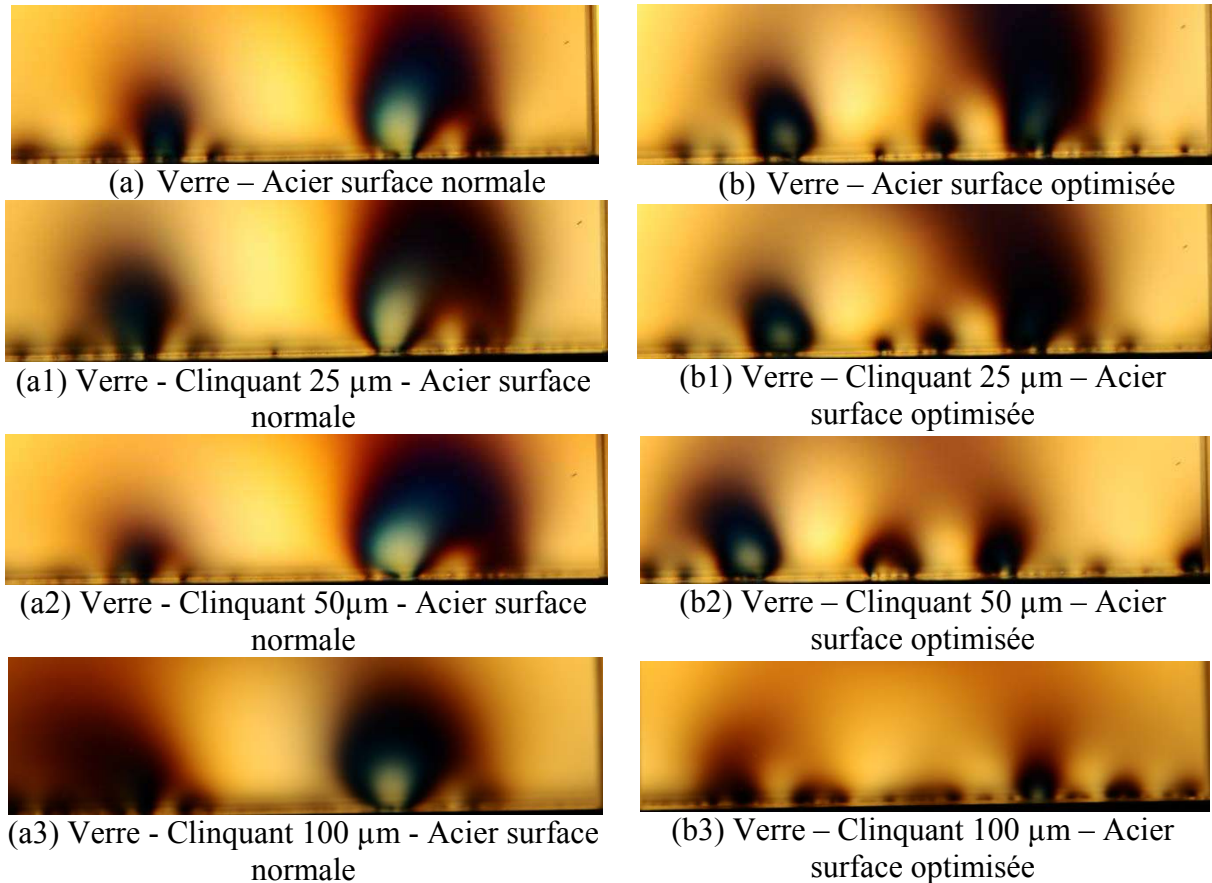


Figure 68 : Concentration de contraintes au contact surface entre le verre BK7 et les deux surfaces usinées par électroérosion de l'échantillon en acier, avec ou sans la présence du film clinquant, force exercée 6000 N

Nous confirmons que, même avec la force de compression plus importante, le contact du verre BK7 avec la surface optimisée est bien meilleur que celui avec l'état de surface normale. En plus de cela, les intercalaires en clinquant diminuent bien l'intensité des points de concentration de contraintes. Plus le clinquant est épais, moins l'intensité de contrainte présente dans le verre est grande. Et avec le clinquant d'épaisseur de 100 μm (Cf. Figure 68 b(3)), nous retrouvons l'aspect de contact verre – acier comme nous l'avons vu lors de notre expérience avec des films Kapton®. Les points de concentration de contraintes ont presque disparu. Nous voyons qu'à l'aide de cette épaisseur de clinquant (acier lisse), il ne reste que des petites auréoles juste au contact surface entre le verre et la surface électro-érodée optimisée de l'acier. Alors qu'avec la surface de l'acier dont la rugosité est de 3,15 μm , la présence des points de concentration de contrainte reste importante, ce qui risque d'éclater la surface du verre.



Figure 69 : Points de concentration de contrainte au contact surface verre – acier électro-érodée optimisée avec intercalage de clinquant d'épaisseur 100 µm

Avec les résultats de ces expériences, nous décidons donc de demander à Composetools de faire l'électroérosion avec la rugosité de 1,12 µm pour les emplacements du verre. Et bien sûr, nous utiliserons une feuille de clinquant de l'épaisseur 100 µm pour faire le calage entre les fenêtres en verre BK7 et le fourreau principal en acier.

2.3 Des exigences de cotations et tolérances

Comme expliqué au chapitre précédent, nous avons besoin d'un jeu minimum (donc une haute précision) au niveau des logements pour les fenêtres en verre et entre les pièces intercalaires avec le fourreau principal. La précision au contact entre chaque pièce nous permet d'éviter les fuites de matières lors du fonctionnement de la machine. Cela est une des difficultés rencontrées lors de l'usinage du fourreau. Nous pouvons obtenir une précision de H7 soit avec le procédé électroérosion (Métal uniquement), soit avec le polissage (Verre uniquement), mais c'est très difficile avec l'ensemble des deux méthodes. Surtout pour les emplacements des fenêtres en verre BK7, une fois que les faces d'appui avec le verre sont usinées par l'électroérosion, il faut qu'elles passent aux 2 étapes de polissage. Par contre, comme nous devons ajouter les feuilles de clinquant pour le calage entre le fourreau en acier et la pièce en verre BK7, nous décidons donc d'alléger la tâche en acceptant un jeu après ces trois phases d'usinage, et en ajustant avec des feuilles de clinquant. Il faut donc que le jeu soit supérieur à 100 µm pour que nous puissions limiter des points de concentration de contraintes.

2.4 Les étapes d'usinage

L'usinage se déroule en plusieurs étapes différentes. Les photos suivantes montrent quelques phases d'usinage du fourreau.

2.4.1 1^{er} étape : Phases d'usinage classique

Ces différentes étapes d'usinages classiques ont été faites au début pour faciliter la partie d'électroérosion.

- Ébauche des diamètres extérieurs du fourreau.
- Forage et rodage du diamètre intérieur Φ 40 mm

- Tournage et finition des diamètres extérieurs du fourreau principal, ces diamètres doivent être concentriques avec le diamètre intérieur Φ 40 mm. (Cf. Figure 70)

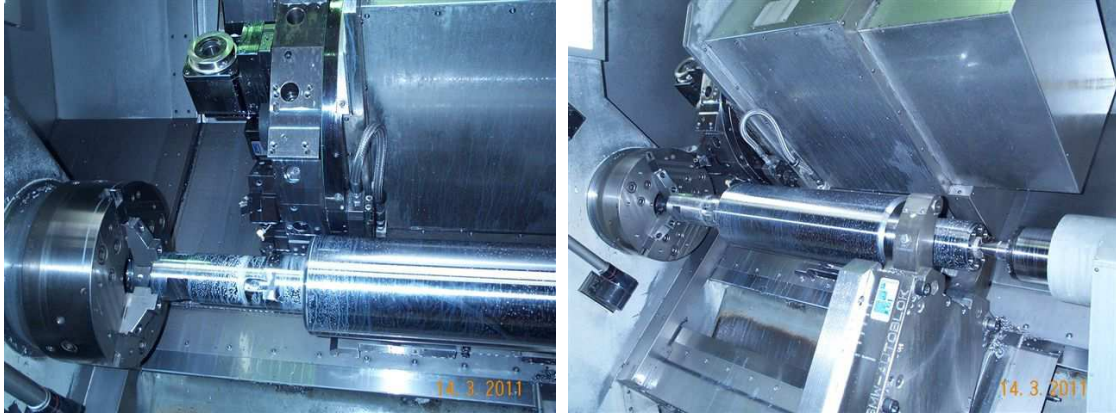


Figure 70 : Finition du tournage pour les deux extrémités du fourreau

- Usinage de la partie plane à 90 mm de l'axe central du fourreau, alésage des centrages pour les découpes à fil des ouvertures pour les emplacements des fenêtres en verre (120 mm x 70 mm)
- Découpe à fil pour les encoches de fixation sur une extrémité du fourreau, puis les trois ouvertures pour l'emplacement des fenêtres en verre et des pièces intercalaires. (Cf. Figure 71 et Figure 73)
- Usinage des ensembles des différentes fixations et des ouvertures sur le fourreau :
 - 12 trous de diamètre Φ 9 mm pour la fixation des cales
 - 3 fixations pour les sondes de températures (Cf. Figure 72)
 - Usinage par fraisage des 3 ouvertures de 100 mm x 20 mm et des 6 ouvertures de 80 mm x 10 mm



Figure 71 : Extrémités du fourreau à la fin d'usinage



Figure 72 : Fixations pour les sondes de température

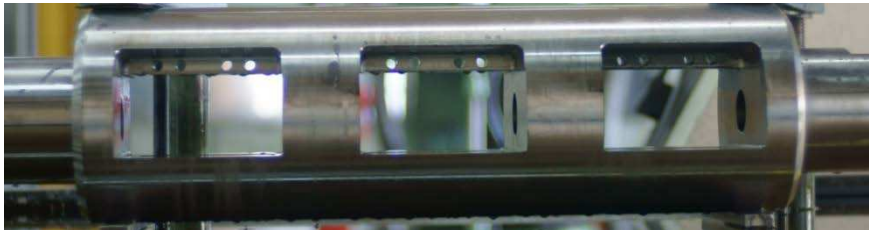


Figure 73: Ouverture de 140 mm x 70 mm pour le logement des fenêtres et les pièces intercalées + trous de fixation des cales Φ 9 mm

2.4.2 2^{ème} étape : Électroérosion

La phase d'électroérosion est réalisée après les usinages classiques. Cela se fait en 2 étapes :

- Ébauche des logements pour des fenêtres en verre et des faces d'appui pour les cales. Cette étape permet d'enlever une grande partie d'acier pour créer la forme des logements voulus.
- Finition (électro – érosion) des différentes faces, surtout les faces d'appui des fenêtres en verre. Pour cette étape, les électrodes utilisées sont des graphites avec un grain très fin (Cf. Figure 74), celles qui permettent d'obtenir des états de surfaces avec une rugosité faible. Dans notre cas, après la phase de finition, la rugosité présente sur les surfaces usinées est de l'ordre de 1,8 μ m. L'usinage de ces trois emplacements pour les fenêtres en verre est présentée dans la Figure 75.



Figure 74 : Différentes électrodes de finition pour l'électroérosion des trois emplacements des fenêtres en verre et montage d'une électrode de finition sur la machine d'électroérosion.

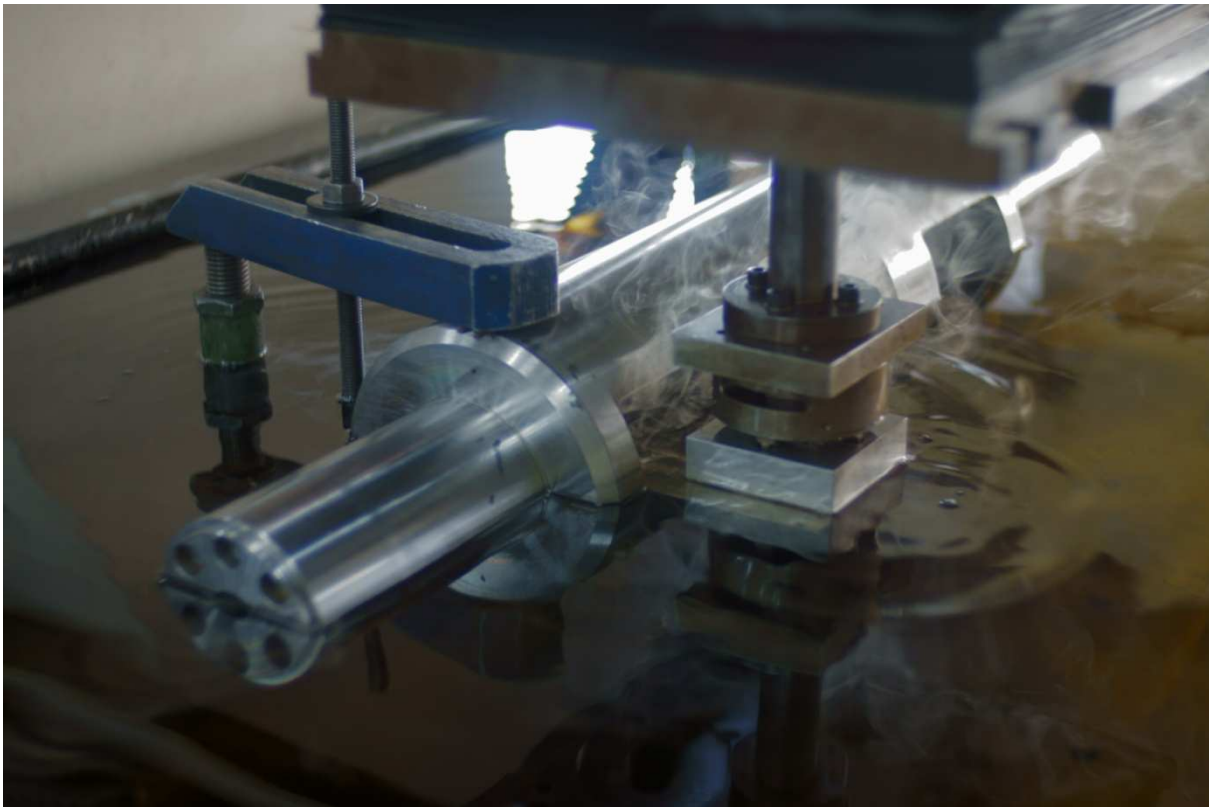


Figure 75: Usinage des trois emplacements pour les fenêtres en verre par électroérosion

2.4.3 3^{ème} étape : Polissage

Cette phase d'usinage nous permet d'améliorer l'état de surface des faces d'appui qui sont importantes, tout en respectant la géométrie et la tolérance d'usinage, car elles sont en liaison directe avec nos fenêtres en verre, qui sont rigides mais quand même très fragiles.

- Tout d'abord, on fait un polissage classique pour affiner les surfaces d'appui des verres et des cales.

- Ensuite, on réalise un polissage sur les faces qui sont en appui avec les fenêtres en verre. Cette étape va diminuer la rugosité de ces dernières à la valeur que nous voudrions ($R_a = 1,12 \mu\text{m}$ – comme l'échantillon que nous avons utilisé pour nos tests auparavant)

2.4.4 4^{ème} étape : Nitruration du fourreau

C'est une phase de traitement de surface pour apporter des qualités nouvelles aux surfaces de notre fourreau : en propriétés mécaniques (la dureté, résistance au frottement, résistance à l'usure, au grippage, à la fatigue, ...), en résistance à la corrosion, en conduction de la chaleur, etc.

Traitements thermiques de surface : [23]

Les traitements se développent en surface vers l'intérieur de la pièce sur une couche de faible épaisseur. Le plus souvent ces traitements sont des durcissements superficiels permettant de conserver à cœur les propriétés du métal de base, avec une ductilité et une résilience plus élevées.

La trempe superficielle : est une trempe réalisée uniquement en surface. Le chauffage est effectué par induction (traitement local, forme irrégulière ...) ou au chalumeau (pour les grandes pièces) et le refroidissement par aspersion ou immersion.

Le traitement thermochimique : est obtenu avec apport en surface par diffusion chimique, sous l'action de la chaleur, d'un ou plusieurs éléments d'addition comme le carbone, l'azote, le soufre, (Cf. Figure 76)

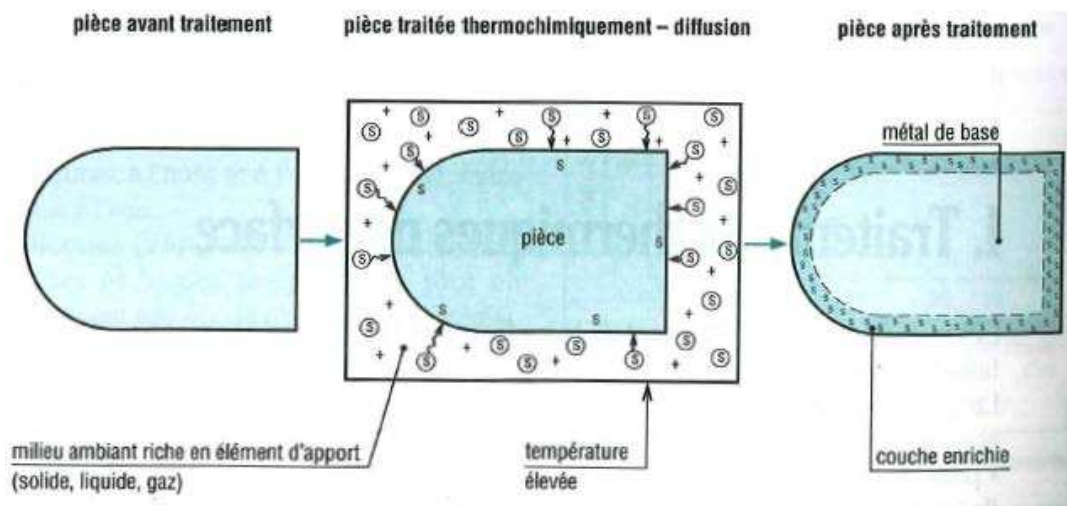


Figure 76: Principe des traitements thermochimiques

3 types de traitement thermo-chimique :

- *Cémentation : traitement le plus classique, il consiste en un apport de carbone dans la surface de la pièce, suivi d'un durcissement par trempe. Pendant le traitement, la pièce est maintenue en contact avec un corps solide, liquide ou gazeux qui est riche en carbone. L'enrichissement de la surface en carbone rend possible la trempe des aciers utilisés, non trempables au départ. Duretés atteintes : 800 à 850 HV. L'inconvénient de cette méthode est que les pièces traitées ont tendance à se déformer et à gauchir.*
- *Nitruration : donne une plus grande dureté que la cémentation, et amène moins de risque de déformations et de gauchissement des pièces traitées. Elle est obtenue par diffusion d'azote en surface. Les pièces sont en contact avec l'ammoniaque NH_3 craqué vers $560^\circ C$, puis suivi par un refroidissement lent. Le durcissement n'est pas obtenu par trempe superficielle, mais par formation de nitrures (fer, chrome et aluminium). La dureté atteinte est de 1100 à 1200 HV. Les inconvénients sont le coût élevé et la mise en œuvre plus délicate que les autres méthodes.*
- *Carbonitruration : est un mélange de cémentation et de nitruration. Il y a un apport en surface de carbone et d'azote par chauffage dans une atmosphère gazeuse, entre 600 et $900^\circ C$. L'opération est généralement suivie par une trempe, parfois par un refroidissement lent. Dureté atteinte : 900 à 950 HV.*

Pour notre fourreau, nous faisons le traitement avec la méthode de nitruration gazeuse, de profondeur de 0,2 à 0,3 mm. La dureté atteinte est de 900 à 1000 HV.

3 L'usinage des pièces intercalaires

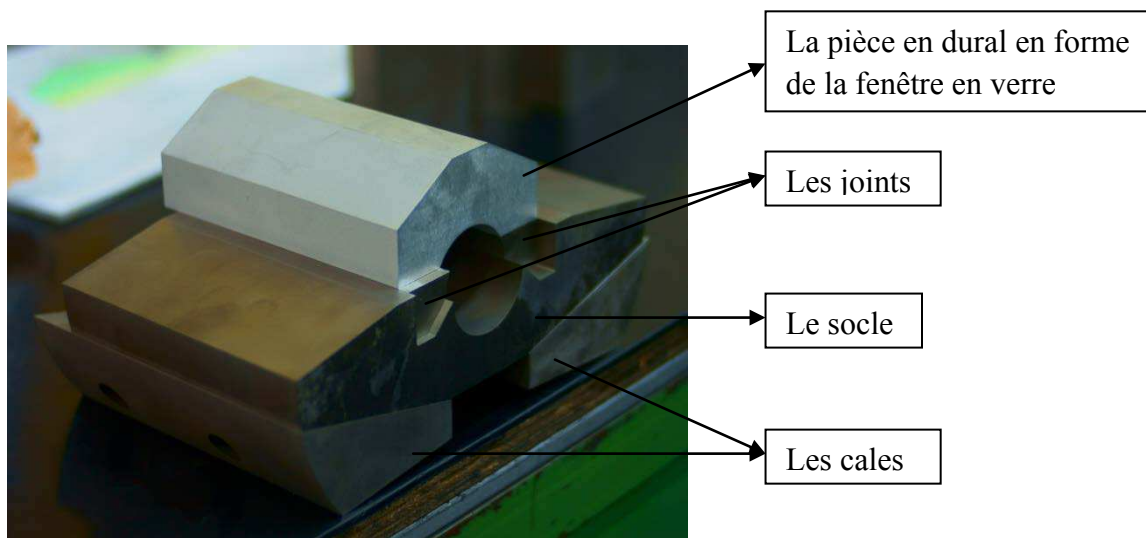


Figure 77 : Exemple de l'assemblage des pièces intercalaires

Ces différentes pièces sont usinées par les méthodes d'usinage classique (généralement par fraisage, et alésage) suivant les plans fournis par nos soins. Elles sont faites avec de l'acier Z38CDV5, avec une précision maximale (H7). Comme pour le fourreau, après l'usinage, le traitement de surface pour toutes ces pièces est nécessaire, pour qu'elles obtiennent une meilleure résistance à la corrosion, à l'usure, etc. En revanche, ces pièces vont être traitées par la méthode de trempe superficielle, qui est mieux adaptée, car certaines de ces pièces ont des formes irrégulières. En utilisant cette méthode, on ne risque pas d'en modifier la géométrie. Un exemple de l'assemblage des pièces intercalaires est présenté dans la figure 77 ci-dessus.