

# Installation pilote pour l'étude des matériaux utilisés en conditions extrêmes

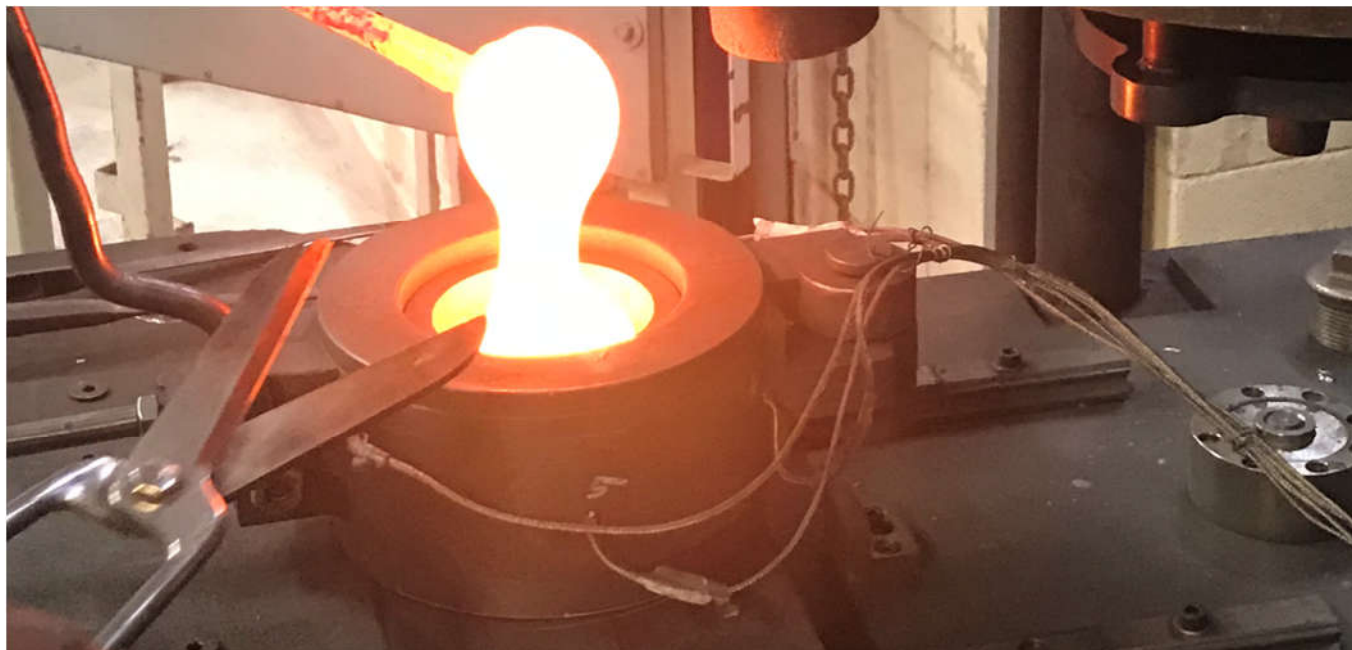
Lucile Cornu, ingénieure R&D – Cervav, Kossiga Agboka, ingénieur R&D – Cervav  
Ousseïni Marou-Alzouma, chef de projet –CRITT-MDTS

E-mail: lucile.cornu@cerfav.fr

## Résumé

*En verrerie, les équipements et outillages en contact avec le verre en fusion subissent des sollicitations thermiques et mécaniques très importantes, d'où la notion de conditions extrêmes. Une étude en cours au Cervav en partenariat avec le CRITT-MDTS, ICAR-CM2T s'intéresse particulièrement au procédé de mise en forme du verre par pressage : les conditions de travail en termes de température et d'effort peuvent être qualifiées d'extrêmes et conditionnent fortement la durée de vie des moules.*

Mots clés: verre, moule, métal, tribologie, mécanique, thermique, plateforme, caractérisation, essais, pressage.



## Contexte du projet Matrex (2017-2019)

L'objectif du projet est de trouver des alternatives aux matériaux classiquement utilisés dans des conditions extrêmes de travail, pour accroître leur durée d'utilisation et leur résistance à ces contraintes.

Le Cerfav, le Critt MDTs et ICAR-CM2T mettent en commun leurs savoir-faire et connaissances concernant le matériau verre, la rhéologie des matériaux métalliques, et leurs propriétés thermomécaniques afin de proposer un pôle d'excellence régional dédié aux matériaux dans des conditions extrêmes.

Pour ce faire, un ensemble de plateformes expérimentales a été mis en commun par les CRT, dont au Cerfav un dispositif instrumenté de mise en forme du verre par le procédé de pressage. L'idée est de produire des pièces en verre par ce procédé tout en analysant les sollicitations thermiques et mécaniques ainsi que l'endommagement de l'outillage pour différents matériaux.

Les résultats du projet pourront être transférés à d'autres procédés de mise en forme et aider dans le choix de matériaux pour de nouveaux moules.

## Conception du moule du démonstrateur (bougeoir)

Pour les essais de mise en forme, il a été convenu de produire des bougeoirs dont la géométrie est présentée dans la (figure 1). Le bougeoir possède une forme de révolution. Le moule destiné à la mise en forme du bougeoir est conçu en plusieurs parties dont l'assemblage est illustré à la (figure 2A). Le moule dispose d'une enveloppe extérieure appelée carcasse dans laquelle vient se loger une enveloppe intérieure appelée empreinte qui sera en contact avec le verre durant le pressage.

L'avantage de ce dispositif est de pouvoir étudier différents matériaux pour l'empreinte sans avoir à ré-usiner le moule complet. Le choix des matériaux de

l'empreinte a fait l'objet d'une batterie de tests (tribologie, qui est l'étude du frottement entre deux corps, et résistance au choc thermique notamment) réalisée avec les partenaires du projet. Ces tests (voir paragraphe suivant) ont permis de sélectionner les matériaux à tester sur le dispositif du Cerfav

L'ensemble des éléments du moule est en fonte à l'exception donc de l'empreinte qui est réalisée avec différents matériaux présentant des propriétés thermiques et mécaniques intéressantes. Chaque moitié de l'empreinte (figure 2B) est munie de trois perçages arrivant à 3 mm de la surface en contact avec le verre. Ces perçages sont destinés à recevoir des thermocouples pour suivre l'évolution de température de l'empreinte pendant le pressage.

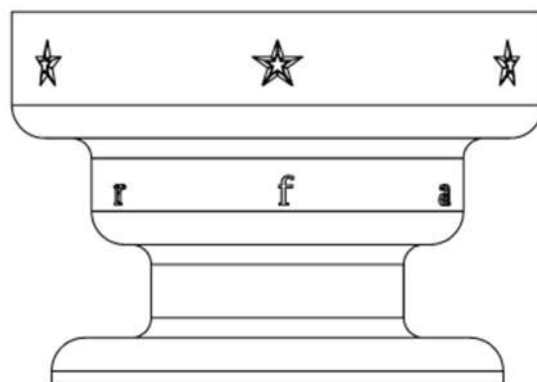
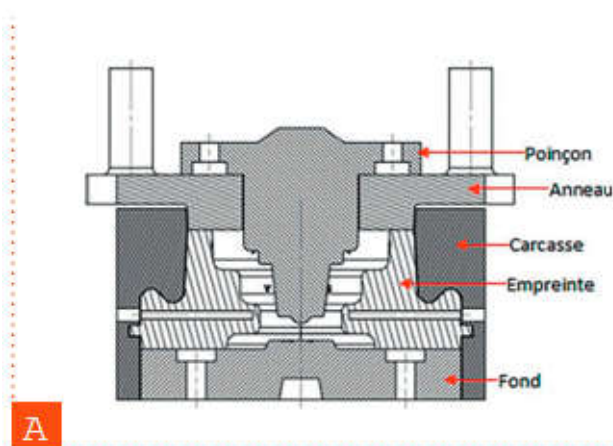


Figure 1 : géométrie du bougeoir



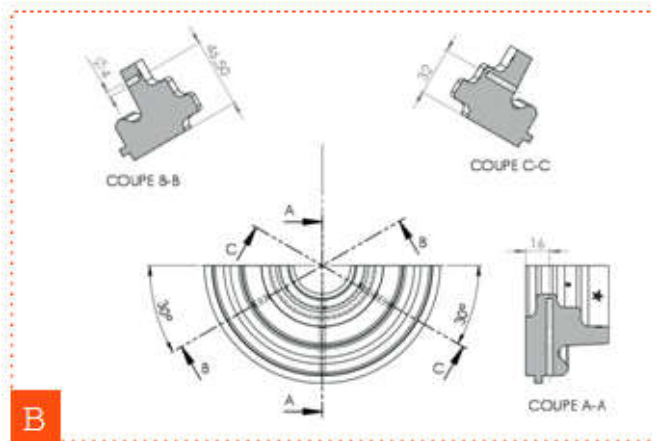


Figure 2 : conception du moule de pressage - A : assemblage des éléments du moule - B : position des thermocouples dans l'empreinte

### Plateforme de tribologie à chaud (CRITT-MDTS)

Il s'agit d'un tribomètre pion/disque « haute température » provenant de la société Anton Paar (figure 3). Le matériau à tester, usiné sous forme de disque, est déposé sur un support fileté à l'intérieur de l'enceinte chauffante et le pion qui représente le matériau antagoniste de frottement est fixé sur un porte-pion. La charge est appliquée par poids morts sur le pion cylindrique (6mm de diamètre) à travers le porte-pion, et le pion est incliné de 45° par rapport à la surface (figure 4). Des capteurs sont placés au niveau du bras élasto-plastique afin de mesurer les forces de frottement tangentielles qui permettront par la suite d'obtenir une courbe de coefficient de frottement.

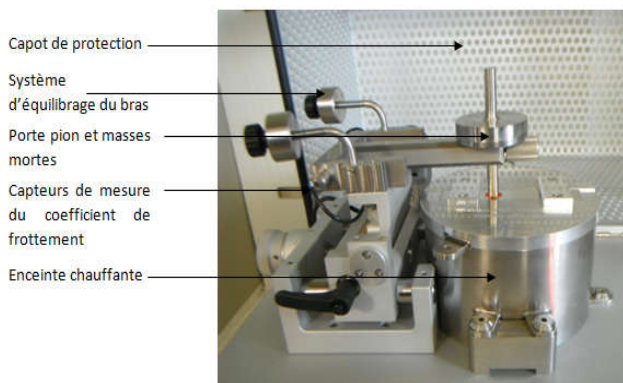


Figure 3a: Tribomètre à chaud du CRITT-MDTS

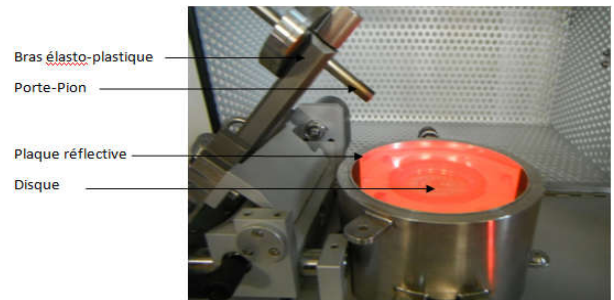


Figure 3b: Vue de l'enceinte chauffante du tribomètre à chaud

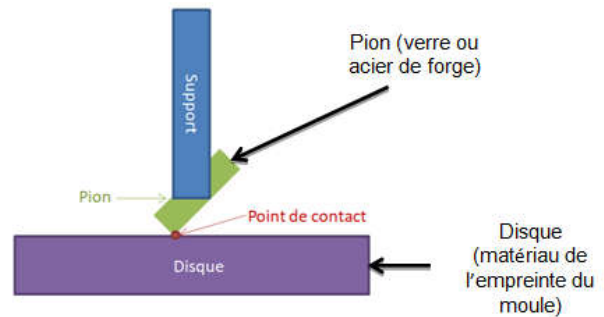


Figure 4 : Vue schématique du tribomètre à chaud

L'ensemble des caractéristiques et des normes auxquelles ce tribomètre répond sont indiquées dans le tableau 1.

Enfin un lubrifiant fluide en provenance de la société Condat Orafor (4%) a été utilisé pour réaliser les essais. Les données de sortie exploitées sont : les coefficients de frottements et les sillons d'usure sur les disques (imagerie, analyse chimique, MEB).

Caractéristiques	Gamme
Charge appliquée	1 à 20N (60N maximum)
Vitesse de rotation	0,3 à 500t/min
Couple maximal	450 Nmm
Force de friction (capteur LVDT)	jusqu'à 20N
Température de l'enceinte	jusqu'à 800°C
Dimensions maximales de disque	Ø 55 mm max
Conformité aux normes	ASTM G99 et G133

Tableau 1: Caractéristiques du tribomètre à chaud du CRITT-MDTS

## Plateforme d'essais de choc thermique (ICAR-CM2T)

Les outillages de verrerie ou de forge sont sollicités mécaniquement lors de la mise en forme des produits mais ils sont aussi sollicités thermiquement. Le cycle imposé par le remplissage de l'outillage et l'éjection de la pièce impose à l'outillage des cycles et chocs thermiques. Dans certains cas, ces chocs thermiques sont accélérés par projection de lubrifiants ou par refroidissement interne dans des canaux de refroidissement. Il arrive aussi qu'accidentellement l'outillage subisse d'importantes projections. Il convient donc que le choix des matériaux ou du couple matériaux/revêtement puisse répondre à ces contraintes sans dommage

Les essais de choc thermique consistent à enfourner les matériaux à tester dans une étuve puis dans un four (figure 5) jusqu'à la température voulue, faire un cycle de trempage à l'eau (figure 6), sécher puis faire des caractérisations à tous les cycles (voir les détails des paramètres de tests dans le tableau 2).



Figure 5: Enceinte de chauffage d'ICAR



Figure 6 : Bac de trempage à l'eau d'ICAR

Cycle de traitement :	Tps, T°C
Cycle étuve	100°C 15 minutes
Cycle FOUR	700°C 30 minutes
Cycle de trempage	trempage à l'eau 10°C
Séchage	essuyage
Pesée et différentes mesures tous les cycles	Aspects, photos
Pesée et différentes mesures tous les 5 cycles	Résonance, masse, aspects et dimension

Tableau 2: Paramètres d'essais de choc thermique

## Essais de mise en forme du démonstrateur

Les essais de mise en forme sont dans un premier temps réalisés avec une empreinte en fonte grise qui sert de référence pour les autres matériaux. Seuls les résultats de la fonte seront présentés dans cet article.

### Procédure expérimentale

Le protocole expérimental utilisé lors des essais est le suivant : le verre est cueilli dans le four de fusion à une température de 1170 °C. Le cueillage du verre est réalisé par un opérateur à l'aide d'une canne munie d'une tête sphérique. Le verre cueilli est ensuite transporté du four jusqu'au moule pour le remplissage de celui-ci.

Lorsque le moule est rempli avec la quantité de verre adéquate, il est déplacé sous le poinçon pour le début du pressage.

En fin de pressage, la température du verre reste suffisamment élevée pouvant conduire à une déformation de la pièce produite. Le verre est donc maintenu dans le moule, puis refroidi par un flux continu d'air généré par une turbine ; ceci dans le but de figer le verre avant l'ouverture du moule (figure 7) et le démoulage.

Les pièces pressées sont numérotées et gardées tous les 10 pressages pour être recuites. La lubrification du moule est effectuée tous les 20 pressages avec un lubrifiant à graphite. Pour une campagne d'essai, 250 pressages sont réalisés, à la suite desquels la surface du moule est observée au microscope. Au total, 5 campagnes d'essai ont été réalisées pour le moule en fonte.

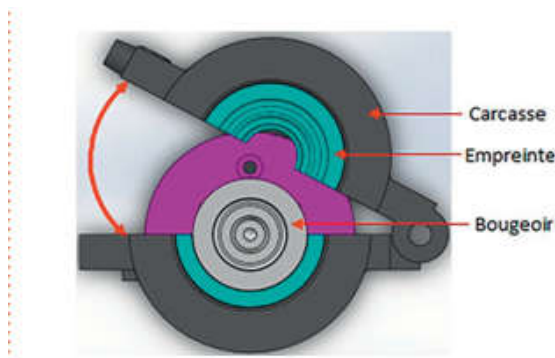


Figure 7 : ouverture du moule (vue de dessus)

### Résultats des essais de pressage

Le rendu des pièces en verre obtenues lors des essais de pressage est présenté à la (figure 8). Les caractéristiques dimensionnelles sont conformes aux dimensions du modèle numérique.

Pour chaque pressage, la température à différentes positions de l'empreinte est enregistrée. L'état de surface du bougeoir varie en fonction de la température du moule. Les pressages sont réalisés pour des températures du moule permettant d'avoir un bon état de surface. La (figure 9) présente l'évolution de la température de l'empreinte à l'une des

positions montrées à la (figure 2B) pour différents pressages de la même campagne d'essai. Les courbes montrent que la température à cette position de l'empreinte est comprise entre 470 et 530 °C. Il faut noter que lorsque la température dépasse un seuil, le verre colle au moule.



Figure 8 : bougeoir en verre pressé

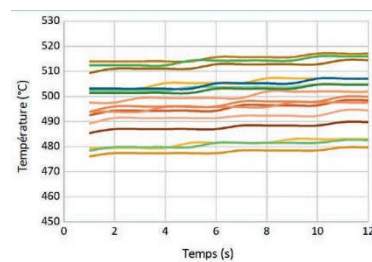


Figure 9 : évolution de la température à une position des thermocouples dans l'empreinte pour différents pressages



Figure 10 : état de surface de l'empreinte au bout de 1250 pressage

À la fin de chaque campagne de 250 pressages, la surface du moule est observée au microscope optique pour un suivi de l'usure de l'empreinte. L'état de surface de l'empreinte au bout de 1250 pressages est présenté à la (figure 10). Les observations montrent une légère dégradation de surface avec une formation de relief sur l'empreinte dû aux frottements répétés du verre à la surface pendant le pressage. Le moule peut encore être utilisé avec de la lubrification dans son état étant donné que les défauts sont simplement superficiels.

### Pour la période 2020-2022

Les travaux présentés dans cet article montrent l'impact des sollicitations thermiques et mécaniques sur l'état de surface de l'outillage et par conséquent sur sa durée de vie.

Un dossier a été déposé pour poursuivre les expériences sur d'autres matériaux pour améliorer la compréhension des phénomènes qui interagissent à la surface du moule et pour faciliter le choix du matériau en fonction des cahiers des charges. Les dépôts de surface, la lubrification et des matériaux innovants seraient alors testés dans cette deuxième phase.

### Remerciements

Pour les industries de la région Grand Est, les matériaux travaillant à des températures et à des niveaux d'efforts très élevés constituent une des problématiques importante pour laquelle des solutions innovantes peuvent être bénéfiques économiquement, que ce soit pour la forge ou pour la verrerie. C'est dans cette optique que quatre CRTs (Centres de Ressources Technologiques) du Grand Est (Cervav, Critt-MDTS, ICAR-CM2T) ont décidé de mettre en commun leurs compétences dans le cadre du projet Matrex « Matériaux en conditions extrêmes », pour apporter des solutions et accompagner les industries dans leur développement.

Ce projet est cofinancé par la Région Grand Est, et par l'Union européenne à travers le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER).

