

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par :

BENHOUHOU Ali & KIRECHE Abdelbare

Thème

**ETUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UN NOUVEAU
DISPOSITIF DE BISEAUTAGE DES BORDS DE VERRE**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
ZAOUI Moussa	MCA	Président
ROKBI Mansour	MCA	Encadreur
ELHADI Abdelmalek	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

D'abord et avant tout, je dois remercier le dieu le tout puissant de m'avoir donné la patience, la force et la volonté afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.

Nous remercions notre encadreur Mr BOKBI MANSOUR de nous avoir fait confiance et de nous avoir suivis de près pendant toute la durée de notre travail.

Nous tenons à remercier également Mr LATRACHE MOHAMED qui nous a participé dans ce modeste travail avec ses conseils, surtout avec le logiciel utilisé dans notre travail (ANSYS 2021), alors merci docteur de son soutien durant cette mémoire.

Aussi je tiens à remercier tous le personnel de Cosider Ouvrages D'art, notamment le directeur et les ingénieurs Issam et Ahmed.

Aussi nous remercions tous les enseignants du département de génie mécanique de l'université de M'sila qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

Merci à tous

Dédicace 1

Je dédie ce travail :

A la mémoire de mon père

A ma chère mère

A ma chère femme.

Ames chères enfants (Souhil L, Abdelhakim, Anes et Barae)

A Mes chers frères et sœurs

A toute ma famille

A tous mes aimables amis.

Benhouhou ali

Dédicace 2

A mes chers parents

A Mes chers frères et sœurs

A toute ma famille

A tous mes aimables amis.

Kireche Abdelbare

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو تقديم اقتراح لنظام شطف الحواف الزجاجية، حيث قمنا بإجراء دراسة وتصميم لماكينه مع تحديد حجم كل مكون وجميع مراحل تحقيق جهاز الميلان.

في هذه الأطروحة، حاولنا فتح منظور حول عملية تصنيع الزجاج هذه والتي لها أهمية كبيرة خاصة في تشييد المباني (الداخلية والواجهات)، في مفهومها المعماري، حيث تكون جودة المنتج النهائي أمرًا ضروريًا و يقدم ضمان جودة عالية للغاية لشطف الحواف. هذا العمل المتواضع أعطى خطوة إلى الأمام لجميع طلاب المستقبل لإجراء بحث معمق في هذا المجال الذي يعد مهمًا جدًا للصناعة الجزائرية.

Résumé

L'objectif de ce travail est de faire une proposition d'un système de biseautage des bords de verre, ou on a fait une étude, conception d'une machine avec dimensionnement de chaque composant ainsi tous les étapes de réalisation de ce dispositif de biseautage.

Dans cette mémoire, on a ouvert un perspective sur ce procédé d'usinage de verre qui à une grande importance surtout dans la construction des bâtiment (intérieur et façades), dans son concept architectural, où la qualité du produit fini est essentielle et elle offre néanmoins la garantie d'une très haute qualité du biseau.

Ce modeste travail a fait un pas en avant pour tous les prochains étudiants pour procéder a des recherches profondes dans ce domaine qui est très importants pour l'industrie algérienne.

Abstract

The objective of this work is to make a proposal for a beveling system for glass edges, where we made a design and study of a machine with sizing of each component and all the stages of realization of this beveling device.

In this thesis, we tried to open a perspective on this glass machining process which is of great importance especially in the construction of buildings (interior and facades), in its architectural concept, where the quality of the finished product is essential. and it nevertheless offers the guarantee of a very high quality of the bevel.

This modest work took a step forward for all future students to do in-depth research in this area which is very important to Algerian industries.

Table des Matières

Introduction Générale	1
Chapitre I :Généralités sur les matériaux	
I.1. Introduction	2
I.2 Définition d'un matériau	2
I.2.1 Définition	2
I.2.2 Propriétés	2
I.2.3 Origines des matériaux	3
I.2.3.1 Origines naturelles	3
I.2.3.2 Origines artificielles	3
I.2.4 Choix d'un matériau	3
I.3. les grandes classes de matériaux	7
I.3.1. les métaux	7
I.3.1.1 les alliages ferreux	7
I.3.1.1 les alliages non ferreux	7
I.3.2 Polymères: matières plastiques	7
I.3.3 Céramique	8
I.3.3.1 Les verres.	9
I.4. Conclusion	9
Chapitre II :Généralités sur les verres	
II.1 Introduction	10
II.2 Historique du verre	10
II.3 Composition des verres	10
II.4 Principaux types de verre	11
II.4.1 Verre de base	11
II.4.1.1 le simple vitrage ou verre recuit	11
II.4.1.2 Le verre armé	12
II.4.1.3 Le verre imprimé	13
II.4.1.4 Le verre profilé	13
II.4.2 Les verres transformés	14
II.4.2.1 Le verre trempé	14
II.4.2.2 Le verre feuilleté	15
II.4.2.3 Le vitrage isolant	16
II.4.2.3.1 Le double vitrage	17

II.4.2.3.2 Le triple vitrage.....	18
II.4.2.3.3 Vitrage à isolationrenforcée.....	19
II.4.2.3.4 Double vitrage dissymétrique	20
II.4.2.4 Le vitrage chromogène	21
II.4.2.5 Le verre autonettoyant	24
II.4.2.6 Le vitrage photovoltaïque	25
II.4.2.7 Le vitrage pour une protection solaire	25
II.5. les différentes étapes de production du verre	26
II.5.1 le mélange de la matière première	26
II.5.2 la fusion	26
II.5.3 le moulage.....	26
II.5.4 la cuisson	26
II.5.5 la finition.....	26
II.6 exemple d'application	27
II.6.1 les différentes étapes de production du verre étiré (flotté)	27
II.6.2 Processus de fabrication du verre flotté.....	27
II.6.2.1 enfouement	27
II.6.2.2 cure de fusion.....	28
II.6.2.3 bain de flottage	28
II.6.2.4 zone de refroidissement	29
II.6.2.5 découpe	29
II.6.3 principale matieres premieres pour la production du verre flotté.....	31
II.6.4 résumé des principales caractéristiques techniques du verre flotté	31
II.6.5 divers traitements sur le verre flotté	31
II.7 propriété physique et chimiques du verre	32
II.7.1 définition et composition	32
II.7.2 propriétés mécaniques	33
II.7.2.1 résistance à la traction et résistance a la compression	33
II.8 les étapes de récupération des verres.....	33
II.9 conclusion	35

Chapitre III :Usinages des verres

III.1. Introduction.....	36
III.2 Définition et principe de fabrication	36
III.2.1 Définition.....	36

III.2.2 Avantages	36
III.2.2.1 fonctionnalités	36
III.2.2.2 esthétique et design	36
III.2.2.3 Principe d'usinage de verrefaçonnage du verre – bords polis	37
III.3 Différents usinage de verre	38
III.3.1 L'usure par frottement	38
III.3.2 Outils de gravure à la roue (taille à la roue)	39
III.3.3 Les abrasifs naturels	39
III.3.4 Les abrasifs artificiels	41
III.4. Façonnage du verre	41
III.4.1 perçage des trous ou encoches	41
III.4.2 sablage et gravure	44
III.4.3 façonnage des bords	44
III.4.3.1 chant biseauté ou arêtes abattues	45
III.4.3.2 chant meulé ou joint plat industriel (JPI) ou rodé mat ou plat mat	45
III.4.3.3 chant meulé ou joint plat poli industriel (JPPI) ou rodé plat satiné	45
III.4.3.4 chant poli ou joint plat poli (JPP) ou plat poli ou rodé poli	46
III.4.3.5 chanfreins	46
III.4.4 Façonnage décors	47
III.4.4.1 joint arrondi (finition mate ou brillante)	47
III.4.4.2 cascade (15 au 19 mm)	47
III.4.4.3 bec corbin ou chapeau napoléon (15 au 19 mm)	47
III.4.4.4 chants grugés	47
III.4.4.5 biseaux	48
III.4.4.6 double biseau (épaisseur minimale = 8 mm)	49
III.4.4.7 biseau double face (épaisseur minimale = 8 mm)	49
III.5 conclusion	49

Chapitre IV : Proposition d'un nouveau système de biseautage.

IV.1 Introduction	50
IV.2 Schéma cinématique du système biseautage	50
IV.3 Différents composants d'une machine de biseautage	51
IV.3.1 Table	51
IV.3.2 Supports	52
IV.3.3 Système de biseautage	52
IV.3.3.1 Moteur électrique	52

IV.3.3.2 Outil de biseautage	53
IV.3.3.2.1 Description des meules	54
IV.3.3.2.2 Montage de l'outil de biseautage (exemple d'application)	54
IV.3.4 Table avec systeme glissant	56
IV.3.5 Chariot glissant.....	57
IV.3.6 Couvercle de protection	60
IV.3.7 Guide cylindrique de glissement.....	60
IV.3.8 Systeme de refroidissement.....	61
IV.3.9 Systeme alimentation électrique et boite de commande	61
IV.4 Etapes de réalisation de la machine de biseautage bords verre	64
IV.5 Dessin d'ensemble	69
IV.6 Simulation de l'opération de biseautage.....	70
IV.7 Conclusion	74
Conclusion Générale.....	75
Références Bibliographiques.	76
Résumé.....	77

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralité sur les matériaux

Tableaux I.1 Quelques propriétés usuelles des grandes familles de matériaux.....	5
---	---

Chapitre II : Généralité sur les verres

Tableaux II.1 Trois catégories d'oxydes composant un verre	11
---	----

Tableaux II.2 Principales matières premières pour la production du verre flotté	31
--	----

Tableaux II.3 Principales caractéristiques techniques du verre flotté.....	31
---	----

Chapitre III : Usinage des verres

Tableaux III.1 Les dix minéraux de l'échelle de Mohs	40
---	----

Chapitre III : Proposition d'un nouveau système de biseautage

Tableaux IV.1 Caractéristique technique du moteur électrique	53
---	----

Tableaux IV.2 Dimensionnements, caractérisations et différentes étapes de réalisation de la machine de biseautage	63
--	----

Tableaux IV.3 Les propriétés mécaniques d'outil et plaque de verre	70
---	----

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les matériaux

Fig. I.1 Classification des matériaux	4
Fig. I.2 Les grandes familles de matériaux.....	6
Fig. I.3 Propriétés mécaniques des matériaux	6

Chapitre II : Généralités sur les verres

Fig. II.1 Illustration d'un simple vitrage	12
Fig. II.2 Illustration du verre armé	12
Fig. II.3 Verre imprimé	13
Fig. II.4 Verre profilé en U pour façade.....	14
Fig. II.5 Verre trempé.....	15
Fig. II.6 Illustration d'un verre feuilleté.....	16
Fig. II.7 Verre feuilleté décoratif.	16
Fig. II.8 Principe de double vitrage.....	17
Fig. II.9 Principe de triple vitrage.	18
Fig. II.10 Fenetre dite « aveugle ».	19
Fig. II.11 Principe de fonctionnement du vitrage à isolation renforcée.....	20
Fig. II.12 Aspect d'un vitrage à isolation renforcée : froid à l'extérieur, chaud à l'intérieur.	20
Fig. II.13 Principe de double vitrage dissymétrique.	21
Fig. II.14 Le vitrage photo chromique.	22
Fig. II.15 Le vitrage thermo chromique.	22
Fig. II.16 Illustration d'un vitrage photo-chromique	23
Fig. II.17 Vitrage à cristaux liquides.....	23
Fig. II.18 Vitrage élect-chrome.....	24
Fig. II.19 Vitrage normale ; vitrage autonettoyant, (b) BIOCLEAN.....	24
Fig. II.20 Vitrage photovoltaïque transparente	25
Fig. II.21 Type de verre teinte antisolaires	26
Fig. II.22 Schéma de processus de fabrication du verre flotté	27
Fig. II.23 Centre d'approvisionnement de l'unité de fabrication du verre flotté	28
Fig. II.24 Cuve de fusion.....	28
Fig. II.25 Four de refroidissement à rouleau.....	29
Fig. II.26 Découpe des plaques de verre	30
Fig. II.27 Plaques de verre de 9m ; et zone des stocks.....	30
Fig. II.28 Les étapes de récupération du verre	34

Fig. II.29 Le processus de recyclage du verre.....	35
---	----

Chapitre III : Usinage des verres

Fig. III.1 Perçage des trous de $\varnothing < 40$ mm	41
Fig. III.2 Perçage des trous de $\varnothing \geq 40$ mm	42
Fig. III.3 Trous débauchés	42
Fig. III.4 Trous rectangulaire	43
Fig. III.5 Encoche 2X.....	43
Fig. III.6 Découpe en forme.....	44
Fig. III.7 Chant biseauté ou arêtes abattues	45
Fig. III.8 Chant meulé ou joint plat industriel(JPI) ou rodé mat ou plat mat.....	45
Fig. III.9 Chant meulé ou joint plat poli industriel(JPPI) ou rodé plat satiné.....	46
Fig. III.10 Chant poli ou joint plat poli(JPP) ou plat poli ou rodé pol.....	46
Fig. III.11 Chanfreins.....	46
Fig. III.12 Joint arrondi.....	47
Fig. III.13 Cascade.....	47
Fig. III.14 Bec de corbin ou chapeau napoléon	47
Fig. III.15 Chants grugés	48
Fig. III.16 Biseau	48
Fig. III.17 Double biseauBiseaux	49
Fig. III.18 Biseau double face.....	49

Chapitre IV : Proposition d'un nouveau système de biseautage des bords de verre

Fig. IV.1 Schéma cinématique du système de biseautage.....	50
Fig. IV.2 Designe de la machine de biseautage des dords de verre	51
Fig. IV.3 table brut	52
Fig. IV.4 support	52
Fig. IV.5 moteur électrique	53
Fig. IV.6 Description des meules	54
Fig. IV.7 outil de biseautage	55
Fig. IV.8 réalisation des deux rainures sur la table fixe	56
Fig. IV.9 chariot glissant avec glissière.....	57
Fig. IV.10 Montage d'un chariot glissant sur la table support.....	57
Fig. IV.11 Système pignon crémaillère.....	58
Fig. IV.12 Vue d'ensemble chariot-moteur-engrenages	59
Fig. IV.13 Verre posé sur le chariot	59

Fig. IV.14 Montage d'un couvercle de protection	60
Fig. IV.15 montage des guides cylindriques	60
Fig. IV.16 Systeme refroidissement (bac,tuyaux et pompe)	61
Fig. IV.17 Tableau des commandes	62
Fig. IV.18 Système alimentation électrique	62
Fig. IV.19 Réalisation de la table fixe	64
Fig. IV.20 Table après usinage	64
Fig. IV.21 Fixation des supports	65
Fig. IV.22 Boulon de fixation	65
Fig. IV.23 Fixation de l'outil et moteur électrique	66
Fig. IV.24 Système de fixation d'outil avec le moteur électrique	66
Fig. IV.25 Système de lubrification	67
Fig. IV.26 Système pignon-crémaillère	67
Fig. IV.27 Chariot glissant	68
Fig. IV.28 Fixation de la pompe, la boîte de commande et système électrique	68
Fig. IV.29 Designe de la machine de biseautage	69
Fig. IV.30 Géométrie de l'outil de biseautage et la plaque du verre biseauté	70
Fig. IV.31 Maillage de l'outil de biseautage et la plaque de verre biseauté	71
Fig. IV.32 Comportement de l'outil lors de l'opération biseautage	71
Fig. IV.33 Application d'une de rotation de 300 tr/min sur l'outil de biseautage	72
Fig. IV.34 Application de la force 10N sur la plaque du verre	72
Fig. IV.35 La zone de contact et frottement	73
Fig. IV.36 Contraintes et déformations résultantes au cours de l'opération de biseautage	74

Introduction Générale



Introduction Générale

Le matériau verre est devenu un matériau incontournable dans les constructions civiles, automobiles, énergies solaires et décoratifs.

Le façonnage des verres est le procédé le plus délicat à réaliser à cause du caractère réfléchissant, le moindre défaut, même minime, est visible.

Le biseau est un façonnage qui spécifique au verre. Il s'agit d'enlever de la matière sur la surface, à partir du bord et avec un angle faible, une petite quantité de matériau, puis de le polir.

Il élimine les irrégularités consécutives à la découpe du verre et enlève le risque de se couper. Il accentue l'esthétique et le design du verre pour les usages suivants : plateaux de tables ou de comptoir, portes, tables basses, étagères, bureaux, miroirs, ...

Le pourtour du verre restera lui complètement transparent, brillant et d'aspect impeccable. C'est la finition la plus sécurisée qui pour le maniement du verre.

La machine du biseautage ou usinage des bords de verre consiste à éliminer les irrégularités due à la découpe des verres

Les biseauteuses exploitent des technologies fiables qui permettent d'atteindre une qualité extrêmement élevée. Il est bien connu que ce genre de travail comporte des difficultés non négligeables. Surtout dans le secteur automobile où le biseautage s'applique à la fabrication de miroirs rétroviseurs, vitres et pare-brises.

La machine de biseautage de la nouvelle génération qui comporte toutes les solutions techniques déjà utilisée et testées sur le modèle supérieur, la machine de ces générations est constituée de plusieurs éléments tel que le convoyeur, les mandrins, les systèmes mécaniques de déplacement des différents axes, la commande numérique.

Souligner l'esthétique d'un verre : façonnage périphérique d'un plateau de table, de comptoir, étagères. Enrichir et personnaliser une réalisation : sablage d'un motif ou d'un logo sur des portes et des cloisons, gravure d'un miroir, découpe d'un plateau de table selon des formes complexes.

Dans le domaine du biseau, la qualité du produit fini est essentielle. Elle offre néanmoins la garantie d'une très haute qualité du biseau, leur conception ayant été principalement ciblée sur l'importance de la qualité du produit fini, dans ce travail on va faire une étude, conception et dimensionnement d'un nouveau dispositif de biseautage des bords de verre.

Ce travail aussi est adressé aux ingénieurs pour l'amélioration des machines de biseautage des bords de verre dans tous les côtés ; conception et réalisation d'un dispositif

CHAPITRE I

Généralités sur les matériaux



I.1 Introduction

Les matériaux sont omniprésents dans notre quotidien. Il n'est pas de structures, d'infrastructures sans matériaux. Il n'est pas de transport ni de production d'énergie sans matériaux. On les dit aujourd'hui nano-structurés, architecturés ou bien encore intelligents. Ils occupent une place fondamentale dans l'activité économique mondiale et sont également 'objet d'une attention particulière de la part des acteurs académiques qui n'ont de cesse de les améliorer, de les adapter et de les optimiser pour répondre aux exigences technologiques, environnementales et sociétales croissantes.

I.2 Caractéristique d'un matériau

I.2.1 Définition

Qu'est ce qu'un matériau ?

Matériau : tout produit (naturel ou artificiel) qui peut être utilisé pour fabriquer des objets.

Matériau : un ensemble d'atomes / molécules avec une fonctionnalité spécifique (solide ou liquide)

Matériau : C'est aussi toute substance, ou matière pouvant destinée à être mise en forme.

Il est essentiel de connaître ses propriétés. On utilise les matériaux pour leurs propriétés

I.2.2 Propriétés

Les propriétés conditionnent les applications potentielles, aussi dépendent de la structure du matériau :

- Au niveau subatomique (électrons+noyaux atomiques)
- au niveau atomique (structure cristalline)
- au niveau microscopique (agglomérats d'atomes)
- au niveau macroscopique (structure « nid d'abeilles »)
- la structure d'un matériau dans le produit final dépend du processus technologique utilisé.

I.2.3 Origines des matériaux

Un matériau peut être :

I.2.3.1 Origines naturelles comme :

- les minéraux : ils sont extraits du sol (eau, terre, sable, ...)
- les organiques d'origine végétales (bois, coton, lin,...)
- les organiques d'origine animale (laine, viande, lait, corne,...)

I.2.3.2 Origine artificielles : il n'existe pas dans la nature ; il faut donc un travail humain ou animal pour transformer des matériaux naturels afin de créer de nouveaux matériaux, C'est ce qu'on appelle les matériaux de synthèse.

- Les métaux que l'on extrait à partir des minéraux (cuivre, zinc, argent, aluminium, plomb,...)
- Les alliages qui sont des mélanges de plusieurs métaux (bronze, laiton, zamac,...)
- Les plastiques que l'on crée à partir d'éléments naturels comme le bois, le charbon et le pétrole ... (PVC, Caoutchouc, Polystyrène, polyamide, Nylon,...).
-

I.2.4 Choix d'un matériau

Le choix d'un matériau, dans une utilisation, dépend de plusieurs critères :

- Caractéristiques mécanique : limite élastique, dureté, résilience, ténacité, ductilité...
- Caractéristiques physico-chimiques : masse volumique, point de fusion, conductibilité électrique et conductibilité thermique, comportement à la corrosion, vieillissement...
- Caractéristiques de mise en œuvre : usinabilité, soudabilité, trempabilité...
- Caractéristiques économiques : prix, disponibilité, expérience industrielle.

C'est matériaux peuvent être regroupés en grandes familles selon l'organigramme suivant :

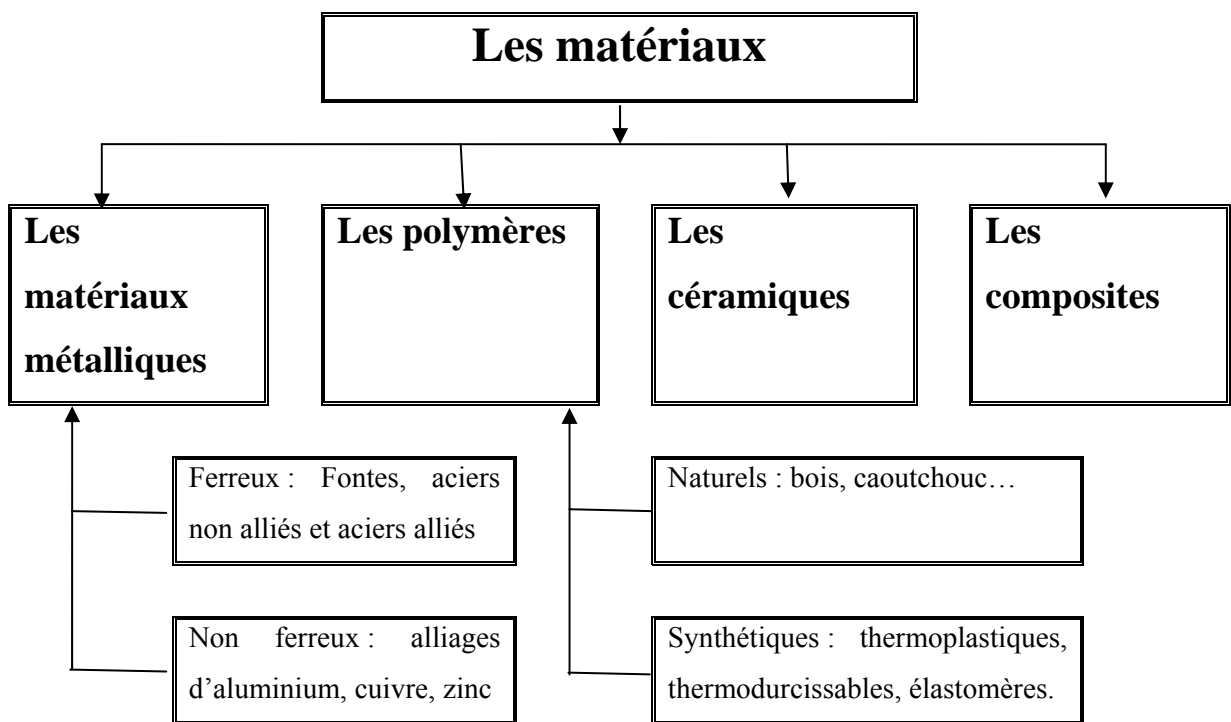
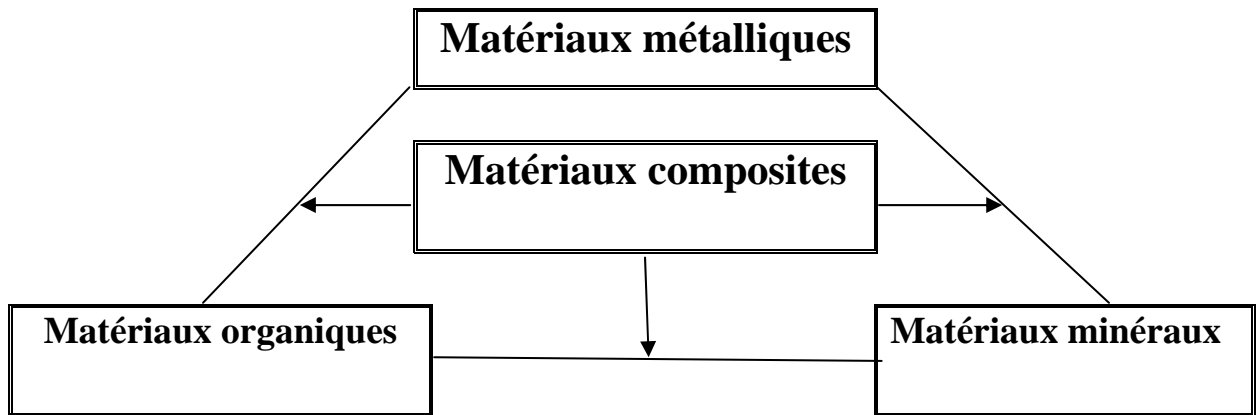


Fig. I.1 : Classification des matériaux

Le classement entre grandes familles de matériaux repose en grande partie sur le type de liaison entre les atomes. Il faut le considérer comme indicatif, le passage d'une catégorie à l'autre pouvant se faire en fonction de la composition chimique et des conditions de mise en œuvre (exemple des verres métalliques). Le **Tableau I.1** donne une indication des principales propriétés usuelles des polymères, des céramiques et des alliages métalliques.

Famille de matériaux	métaux	Polymères et élastomères	Céramiques et verres
Densité	élevé	faible	faible
Rigidité (module d'young)	élevé	faible	faible
Coefficient de dilatation thermique	moyen	élevé	faible
Dureté	élevé	Faible à élevée (fibres)	élevé
Ductilité (déformation a la rupture)	Elevée (plasticité)	Elevée sauf à l'état vitreux	Faible et aléatoire
Conductivité électrique. thermique	élevée	Faible (isolants)	électrique : faible Thermique : élevé
Résistance a corrosion	faible	En général élevée	élevée
Température max. d'utilisation	élevée	Faible (toujours < 200°C)	Très élevée
Mise en forme	facile	Très facile (moulage)	Difficile (frittage)

Tableau I.1 : quelques propriétés usuelles des grandes familles de matériaux

Les composites réalisant généralement une combinaison de ces différentes propriétés, optimisée selon l'emploi du matériau considéré. La figure 1.3 montre quelques possibilités ou combinaisons pour l'obtention des matériaux composites.

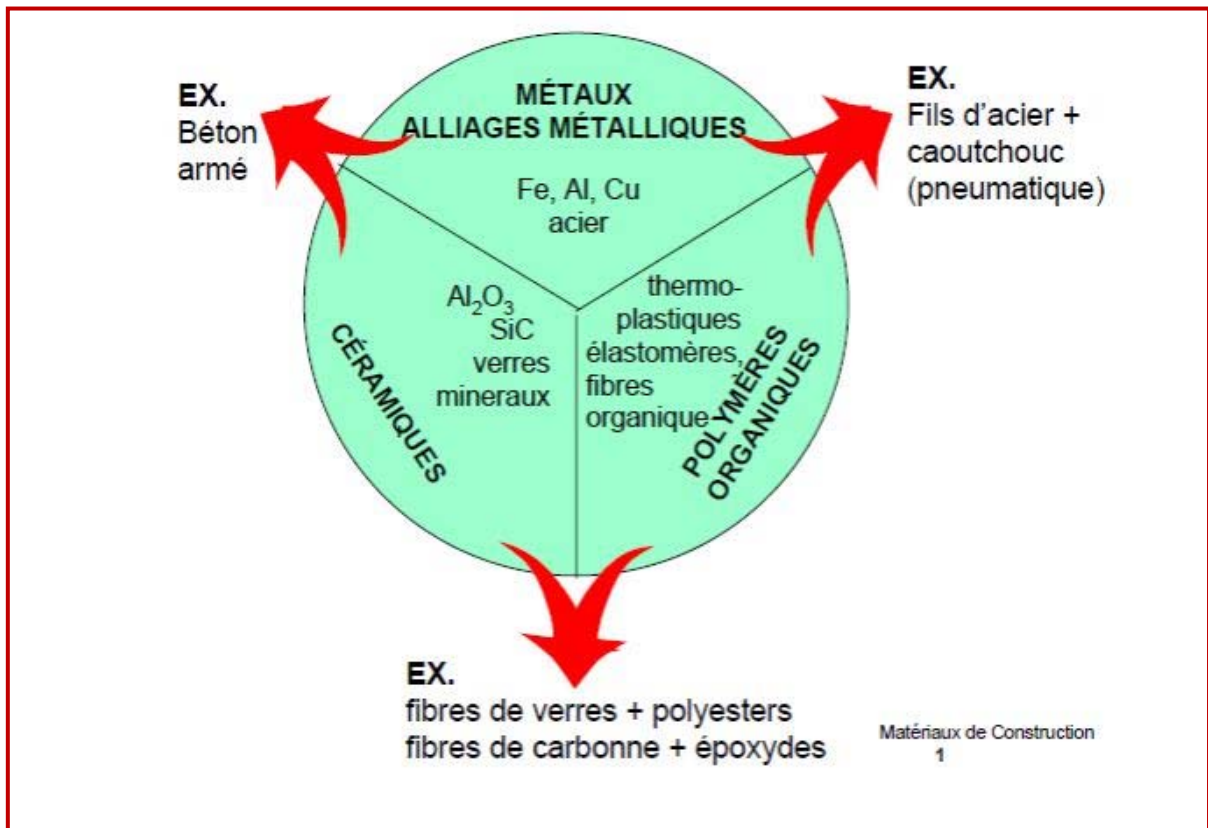


Fig. I.2 : Les grandes familles des matériaux.

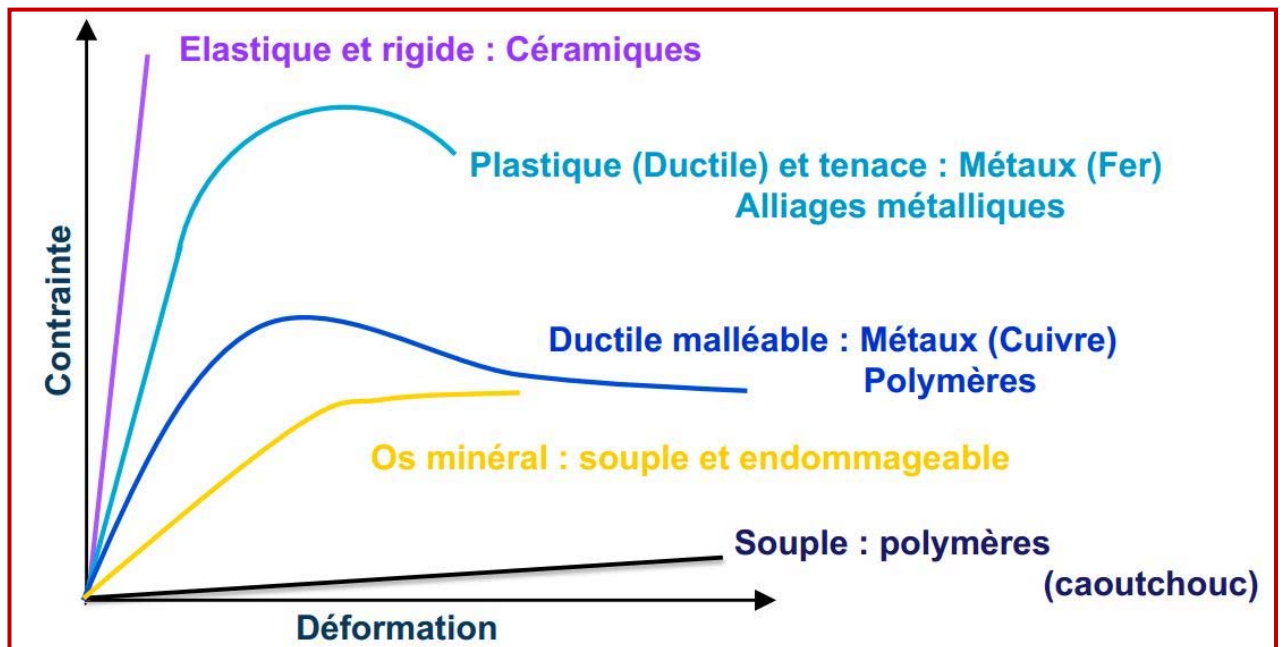


Fig. I.3 : Propriétés mécaniques des matériaux.

I.3 les grandes classes de matériaux

Les matériaux peuvent être classés, selon leurs natures, en plusieurs classes.

I.3.1 Les métaux :

Les métaux sont des matériaux dont les éléments chimiques ont la particularité de pouvoir former des liaisons métalliques et perdre des électrons pour former des cations (exemple : Fe \rightarrow Fe⁺² ou Fe⁺³). Ils peuvent être caractérisés aussi bien de manière physico-chimique que de manière électronique.

Les métaux se caractérisent par plusieurs particularités physiques. Ils sont de bons conducteurs électriques, cette caractéristique se mesure soit grâce à la conductivité soit grâce à son inverse, la résistivité. Ils sont aussi de bons conducteurs thermiques et possèdent un éclat lumineux.

I 3.1.1 Alliages ferreux

Les alliages à base de fer (aciers et fontes) ont un rôle capital sur le plan technologique. Ils constituent en masse près de 90% de la production mondiale de matériaux métalliques. Plusieurs facteurs expliquent cette importance : les alliages ferreux se prêtent facilement à une production en masse, ils sont bon marché et on peut les acquérir sous des formes très variées grâce à la diversité des traitements thermiques et des éléments d'addition.

I 3.1.2 Alliages non ferreux

Ils ne représentent que 10% des matériaux métalliques utilisés dans l'industrie, mais ils ne sont pas moins utilisés pour certaines de leurs propriétés spécifiques : masse volumique faible, propriétés électriques, résistance à la corrosion et à l'oxydation, facilitée de mise en œuvre. Ces avantages l'emportent dans certaines applications, malgré le coût de revient plus élevé de ces alliages.

I .3.2 Polymères : matières plastiques

Un polymère est une substance composée de macromolécules organiques (ou parfois minérales). Les macromolécules sont constituées d'un enchaînement répétitif d'au moins un type de monomère. Les monomères sont reliés entre eux par des liaisons covalentes. Les chaînes de polymères interagissent entre elles avec des forces plus faibles comme des liaisons de Van der Waals.

Les polymères peuvent être fabriqués de diverses façons. On peut citer :

- *les homopolymères* : fabriqués avec le même monomère ;
- *les copolymères* : fabriqués avec des monomères différents.

Un autre type de classification des polymères est aussi selon leurs propriétés thermomécaniques. On distingue :

- *les polymères thermoplastiques* : ils deviennent malléables quand ils sont chauffés, ce qui permet leur mise en œuvre et les recycler.

- **Les polymères thermodurcissables** : ils durcissent a chaud et/ou par ajout d'un durcisseur en faible proportion. Ce durcissement est en général irréversible qui les rendent non recyclables ;
- **Les élastomères** : ils présentent en général un allongement réversible très important et une température de transition vitreuse inférieure a l'ambiante. Ils sont des matériaux aux propriétés bien particulières. Ce sont des polymères de haute masse moléculaire et a chaines linéaires.

I 3.3 Céramiques

Celles-ci sont composées d'éléments métalliques. Elles sont généralement des oxydes, des nitrures, ou des carbures. Le groupe des céramiques englobe une vaste gamme de matériaux, comme les ciments, les verres, les céramiques traditionnels faites d'argile, etc.

Elles sont caractérisées par des liaisons fortes, se qui se traduit dans la pratique par un très bonne tenue en température et une excellente rigidité élastique. La faible tendance à la plasticité qui en résulte rend ces matériaux fragiles, peu tenaces, peu ductiles, mais en revanche, résistants a l'usure. Ces matériaux ont de hauts points de fusion et une bonne résistance à la corrosion. Les céramiques techniques de qualité ont tendance à être chères.

Les céramiques ont de nombreux avantages :

- Propriétés mécaniques : elles présentent, comme les métaux, un module d'young bien défini, c.-à-d. que le module reste constant pendant l'application d'une charge (contrairement au polymère dont l'élasticité n'est pas linéaire). De plus, elles ont la plus grandes dureté de tous les matériaux, et sont d'ailleurs utilisées comme abrasifs pour couper (ou polir) les autres matériaux ;
- Résistance aux chocs thermiques en raison d'un faible coefficient de dilatation ;
- Bonne résistance chimique ;
- Résistance à la corrosion ;
- Isolation thermique et électrique.

Par contre, leur principale faiblesse est d'être prédisposée a rompre brutalement, sans déformation plastique en traction (caractère fragile) ; les porosités « affaiblissement » le matériau en entrainant des concentrations de contrainte a leur voisinage

Ils sont essentiellement des solides obtenus par figeage de liquide surfondu. Les quatre principales méthodes de fabrication du verre sont le pressage, le soufflage, l'étirage et le fibrage.

I 3.3.1 Les verres

Les verres sont des silicates non cristallins qui contiennent d'autres oxydes (CaO, par exemple) qui en modifient les propriétés. La transparence du verre est l'une de ses propriétés les plus importantes. Ceci est dû à sa structure amorphe et à l'absence de défauts de taille supérieure à la fraction de micromètre. L'indice de réfraction d'un verre est de 1,5. Pour ce qui est de leurs propriétés mécaniques les verres sont des matériaux fragiles, mais traitements thermiques ou chimiques peuvent y remédier.

I.4 Conclusion

Ce chapitre présente une généralité sur les matériaux existant sur terre que se soit d'origine naturelle ou artificielle, des définitions et leurs utilisations dans l'industrie et l'économie mondiale, ainsi que la définition du matériau verre du point de vue atomique et physique. Ces données sont recommandées de les aborder car lors du second chapitre, nous devons comprendre la composition et la fabrication du verre et les différents verres existant.

CHAPITRE II

Généralités sur les verres



II.1 Introduction

Le verre est un matériau qui se caractérise par le fait d'être transparent et d'avoir un certain poids. Il est aussi connu pour se casser facilement car le verre ne se déforme presque pas.

Aujourd'hui on arrive à améliorer beaucoup des propriétés du verre en modifiant les ingrédients et les conditions de fabrication du verre et de trouver ainsi beaucoup d'applications.

II.2 Historique du verre

Comme le plastique, le verre est un matériau qui a été créé par l'homme et on ne le trouve pas dans la nature. La principale ressource utilisée pour produire du verre, c'est du sable.

Le verre est considéré comme l'un des plus anciens matériaux façonnés par l'homme. L'origine de la fabrication du verre demeure à nos jours une énigme. D'après les spécialistes, les objets en verre les plus anciens qui ont été découverts, comme les glaçures de céramiques, datent du VII^{ème} siècle Av J-C.

On peut parler d'une véritable activité de production à partir de 3500 Av J-C. sous la forme de perle de verre, puis de bagues et de petite figurines fabriquées à l'aide de moules. La technique à base de sable fut développée vers 1500 Av J-C. cette technique consistait à longer, dans la masse en fusion, un noyau céramique fixé sur une baguette comme forme négative, puis à le faire tourner autour de son axe jusqu'à ce que la masse de verre visqueuse y adhère fermement. La masse obtenue était alors roulée sur une plaque jusqu'à obtenir la forme souhaitée. Le matériau était ensuite refroidi, le noyau retiré et l'objet en verre brut affiné par polissage et meulage.

II.3 Composition des verres

Au sens commun, le verre est un matériau dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible, à base d'oxydes de silicium (silice SiO_2 , le constituant principale du sable).

Les verres silicatés transparents sont les plus répandus, par exemple pour les fenêtres, les bouteilles ou les verres à boire. Il existe cependant d'autres types de verre organiques ou métalliques.

Les propriétés du verre dépendent de sa structure. Les oxydes, qui composent le verre, peuvent être classés en trois catégories suivant leur rôle dans le réseau vitreux : les formateurs, les intermédiaires, ils sont présentés dans le ([Tableau II.1](#))

formateurs	modificateurs	Intermédiaires
SiO ₂	NaO	Al ₂ O ₃
GeO ₂	CaO	PbO
B ₂ O ₃	BaO	CdO

Tableau II.1 : (non exhaustive) des trois catégories d'oxydes composant un verre.

II.4 Principaux types de verre

D'abord destinés aux fenêtres, les vitrages habillent aujourd'hui les façades et signent la modernité de grands projets architecturaux : le verre est aussi un matériau High Tech, fonctionnent et affiné, jouant pleinement ou discrètement de ses qualités de transparence.

Le verre ferme l'espace intérieur en permettant la vision, l'éclairage et le captage de l'énergie solaire. Au-delà de la transparence, les nouveaux vitrages doivent remplir d'autres fonctions : thermique, acoustique, esthétique, sécuritaire. Le choix d'un vitrage dépendra donc performances à atteindre relativement à ces fonctions, pour assurer le confort des occupants. Nous allons voir quelques types de vitrages selon qui soient des verres de base ou des verres transformés.

II.4.1 Verre de base

II.4.1.1 Le simple vitrage ou verre recuit

Il s'agit d'un verre obtenu par le procédé de fabrication « Float » que l'on a décrit ci-dessus. Les matières premières sont dosées et introduites dans le four de fusion. Le mélange arrive alors sur un bain de métal en fusion sur lequel se forme la feuille de verre plane et d'épaisseur constante. Le verre entre alors dans le four de recuisson, où il subit un refroidissement progressif et contrôlé jusqu'à 50 °C, en vue d'éliminer les tensions internes et de permettre la découpe ultérieure du verre. C'est pour cette raison que ce type de verre est appelé verre recuit.

Le float est un verre plan, recuit, transparent, clair ou coloré, dont les deux faces sont planes et parallèles représenté par la (**Fig. II.1**).



Fig. II.1 : Illustration d'un simple vitrage.

II.4.1.2 Le verre armé

On incorpore dans le verre, lors de la phase de fabrication, un treillis métallique destiné à maintenir les morceaux de verre en place en cas de bris mais ne participant pas à la résistance mécanique ou thermique que l'on peut apercevoir sur la **Fig. II.2**.

Les performances de ce type de vitrage sont les mêmes que celles d'un simple vitrage.

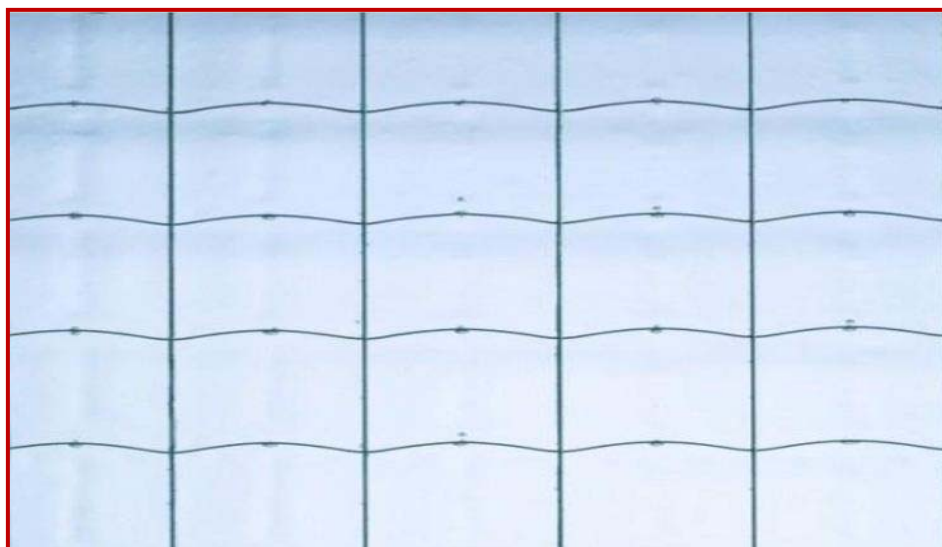


Fig. II.2 : Illustration du verre armé.

II.4.1.3 Le verre imprimé

Le verre imprimé est obtenu par coulée continue, dont une ou les deux faces comportent des dessins réalisés en faisant passer la feuille de verre entre des rouleaux texturés au moment du laminage. La figure II.6 présente un verre imprimé de décoration (**Fig. II.3**).



Fig. II.3 : Verre imprimé.

II.4.1.4. Le verre profilé

Il s'agit d'un verre recuit obtenu par coulée continue suivie d'un laminage et d'un processus de formage, le plus souvent en forme de U (voir **Fig. II.4**). Les fibres métalliques y peuvent être introduites lors de la fabrication pour en faire du verre profilé armé. Il peut être confectionné en double paroi pour les bâtiments à faible teneur en humidité pour limiter les problèmes de condensation entre les parois. Il s'applique en paroi tant intérieure l'extérieure mais nullement dans un endroit où un vitrage de sécurité est requis (toiture, risque de chute).

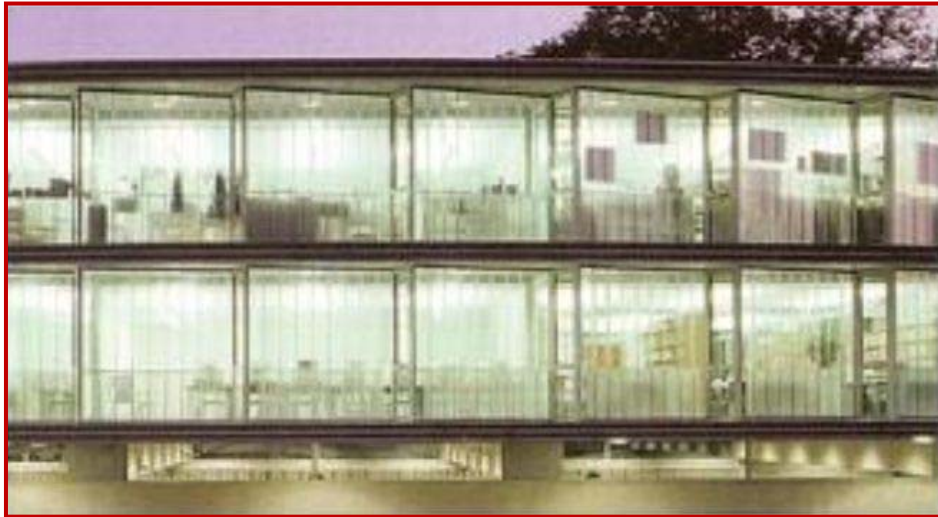


Fig. II.4 : Verre profilé en U pour façade.

Le verre profilé en forme de U armé de fils métalliques longitudinaux est un produit verrier translucide qui peut être assimilé à du bardage. Il apporte ainsi une lumière naturelle à l'intérieur du bâtiment, tout en le protégeant des regards extérieurs.

II.4.2 Les verres transformés

II.4.2.1 Le verre trempé

Il s'agit d'un verre ayant subi un traitement thermique de renforcement augmentant considérablement sa résistance aux contraintes mécaniques et thermique. Il existe pour cela deux procédés : la trempe thermique et la trempe chimique.

La première consiste à chauffer le verre jusqu'à environ 600-650 °C avant de subir un refroidissement brutal par jets d'air. Le verre trempé ne peut plus se découper ou se façonner. Si le verre se brise pour une raison quelconque, il se fragmente en de multiples morceaux non coupant, dont la grandeur dépend de l'état de trempe. Ce qui permet de minimiser les risques de blessures profondes. On retrouve les principales applications de ce verre dans le bâtiment (portes, balustrades, allèges, cabine douche, ...). La trempe chimique obtient significativement les mêmes résultats, mais avec une technique différente : le verre est placé dans un bain à 400°C composé de sels de potassium. Le remplacement des ions sodium du verre par les ions potassium du bain va créer la même compression du verre que par le procédé thermique.

Un verre trempé peut être 5 fois plus résistant qu'un verre ordinaire. La figure (**Fig. II.5**) met en relief l'aspect du verre trempé.



Fig. II.5 : Verre trempé.

II.4.2.2 Le verre feuilleté

Il est composé de deux ou plusieurs feuilles de verre assemblées à l'aide d'un ou plusieurs films plastiques (le PVB : Poly Vinyl Butyral), résine ou gel. Après la mise en place des composants, l'adhérence parfaite est obtenue par traitement thermique s'il s'agit de film plastique (par autoclave). En présence de résine, la mise en place se fait par coulage de résine liquide entre les verres et à la faire durcir sous des lampes ultra-violet. Ce type de verre ne peut être ni coupé, ni scié, ni percé ou façonné (**Fig. II.6**).

Ces performances peuvent être la limitation des blessures en cas de bris, la protection contre l'effraction, protection contre les armes à feu, les explosions, les incendies, isolation acoustique, la décoration. Le nombre et l'épaisseur de chaque élément du vitrage feuilleté est normalisé avec la notation suivante : 44.2 par exemple signifie que le vitrage comporte deux couches de verre épaisses de 4 mm chacune ainsi que 2 intercalaires PVB que l'on peut apercevoir sur la figure (**Fig. II.7**). Le 33-1 comprend donc 2 feuilles de verre de 3mm d'épaisseur + 1 feuille de PVB (épaisseur de 0.38mm).

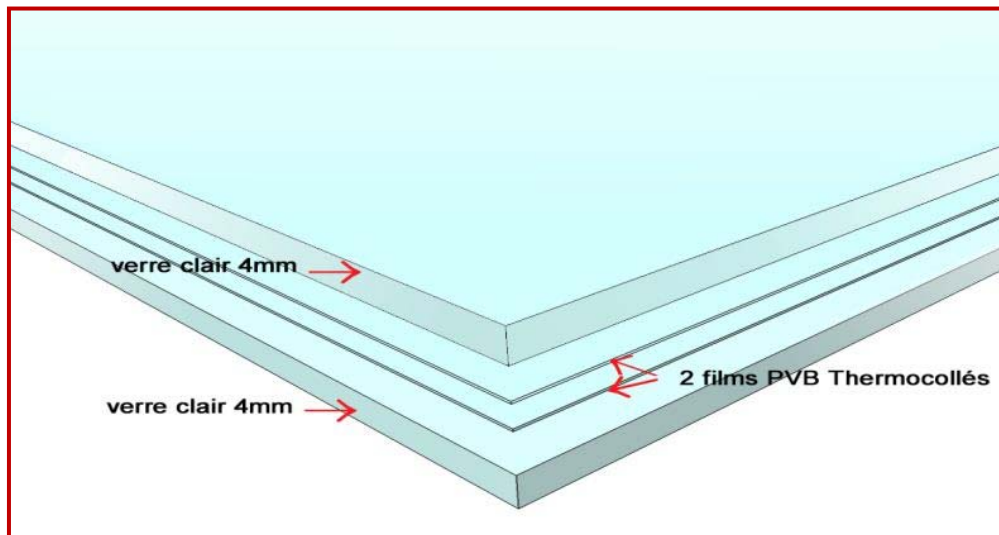


Fig. II.6 : Illustration d'un verre feuilleté 44.2.

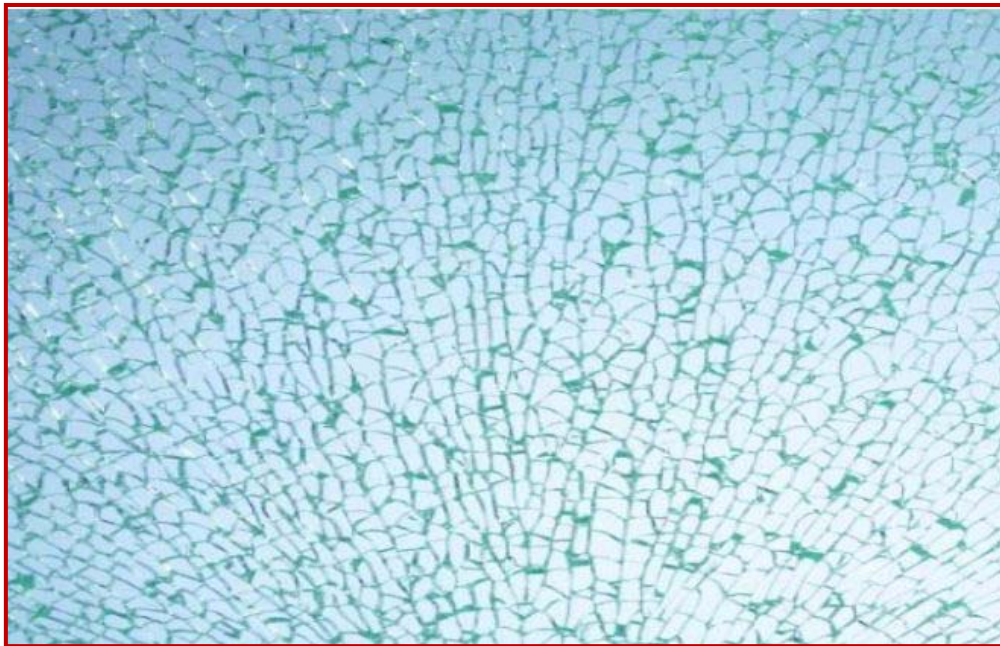


Fig. II.7 : Verre feuilleté décoratif.

II.4.2.3 Le vitrage isolant

Ces vitrages ont des propriétés d'isolation thermique et acoustique qui procurent de nette économie d'énergie et permettent d'avoir de grandes fenêtres sans en avoir les inconvénients. Il est composé au minimum de deux feuilles de verre écartées au niveau des bords par un espaceur. On distingue :

II.4.2.3.1 Le double vitrage

Le double vitrage représenté par la figure (**Fig. II.8**) consiste à assembler deux feuilles de verres

séparées par une lame d'air (espace hermétique) ou un gaz déshydraté améliorant l'isolation thermique (souvent de l'argon). Le but premier de cet assemblage est de bénéficier du pouvoir isolant apporté par la lame d'air ou de gaz. Le double vitrage se compose des éléments suivants :

- Deux feuilles de verre ;
- Un espaceur ou intercalaire en aluminium ou acier séparant les deux feuilles de verre ;
- Etanchéité périphérique est assurée par des joints organiques (ex : le mastic) ;
- Des agents déshydratant sont contenus dans l'intercalaire qui vont empêcher l'humidité de l'air de pénétrer entre les vitres est, la plupart du temps, ajouté à l'ensemble pour éviter la formation de buée. Il s'agit de petites billes poreuses, placées sous l'intercalaire absorbant l'humidité (système d'assemblage périphérique).

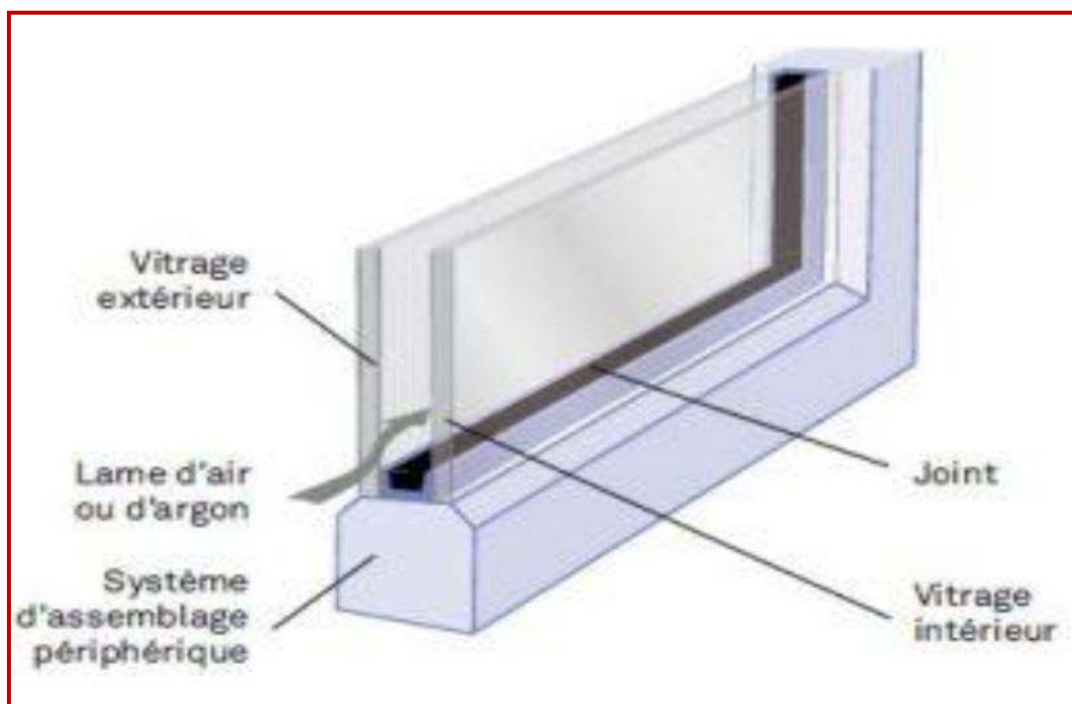


Fig. II.8 : principe du double vitrage.

Par exemple, un double vitrage classique de type 4-16-4 est constitué d'une première vitre de 4mm, d'une couche d'air de 16mm, puis, d'une seconde vitre de 4mm.

II.4.2.3.2 Le triple vitrage

Ce vitrage consiste à améliorer le pouvoir isolant en ajoutant une troisième plaque de verre séparé par deux espaces d'air ou le gaz que l'on aperçoit sur la figure II.12. Il s'agit aussi d'une augmentation de l'épaisseur totale et du poids du vitrage. En outre les transmissions solaire et

lumineuse diminuent. Pour les deux types de vitrage, en cas de détérioration du système d'étanchéité, l'humidité pénètre dans l'espace intermédiaire et se condense et la fenêtre est dite « aveugle » (voir **Fig. II.9**). La différence d'humidité entre l'espace intermédiaire et l'extérieur entraîne une importante chute de la pression de vapeur.

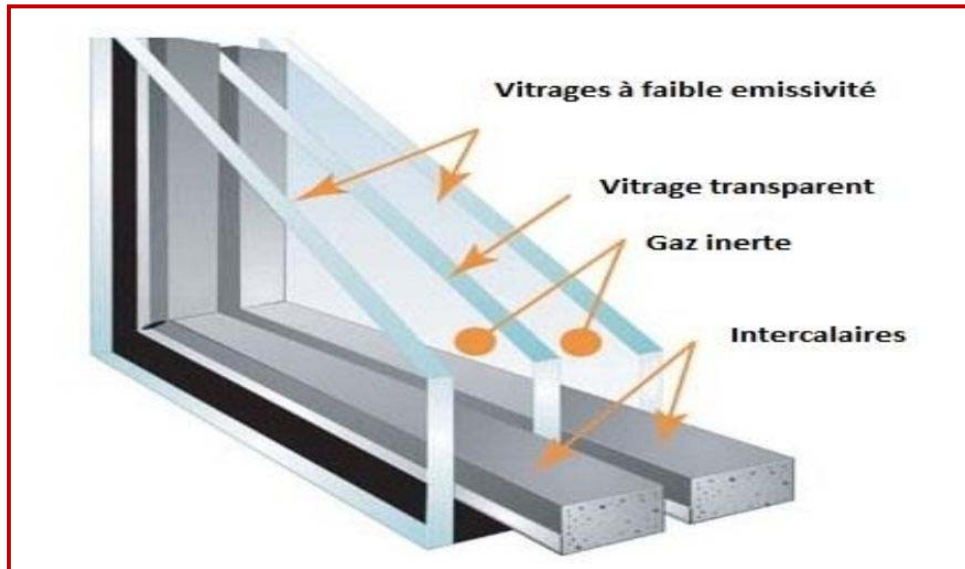


Fig. II.9 : Principe du triple vitrage.



Fig. II.10 : Fenêtre dite « aveugle ».

II.4.2.3.3 Vitrage à isolation renforcée

Ce vitrage appelé aussi vitrage peu émissif permet de réduire les pertes de chaleur par

rayonnement. Le principe de fonctionnement selon la figure (Fig. II.11), est de conserver la chaleur au sein de l'habitat intérieur. Le rayonnement solaire traverse le vitrage et réchauffe les parois de la pièce. Ces parois émettent de la chaleur (rayonnement infrarouge) vers l'intérieur de la pièce. Le vitrage comporte un revêtement spécial déposé sur la surface intérieure (de l'argent ou des oxydes métalliques comme le nickel ou le titane). Ce revêtement joue un rôle de barrière thermique à l'intérieur du vitrage et réduit les pertes de chaleur de 30%. Prenons l'exemple de la saison d'hiver, froid à l'extérieur et chaud à l'intérieur (voir Fig. II.12).

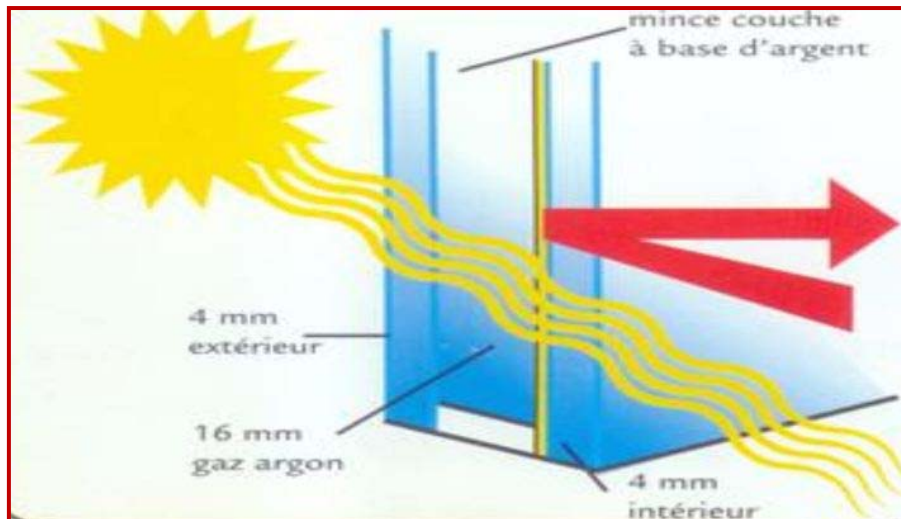


Fig. II.11 : Principe de fonctionnement du vitrage à isolation renforcée [20].



Fig. II.12 : Aspect d'un vitrage à isolation renforcée : Froid à l'extérieur, chaud à l'intérieur.

II.4.2.3.4 Double vitrage dissymétrique

Pour améliorer l'isolation acoustique d'un double vitrage, on peut utiliser des verres d'épaisseurs suffisamment différentes de sorte que chacun des deux verres puisse masquer les faiblesses de l'autre lorsqu'il atteint sa fréquence critique. Cela revient à dire que le verre extérieur est plus épais et passe de 4 à 10 mm et la lame d'air de 16 à 10 mm par rapport à un double vitrage normale (4/10 /4). Cette modification permet d'atténuer le bruit (voir Fig. II.13).

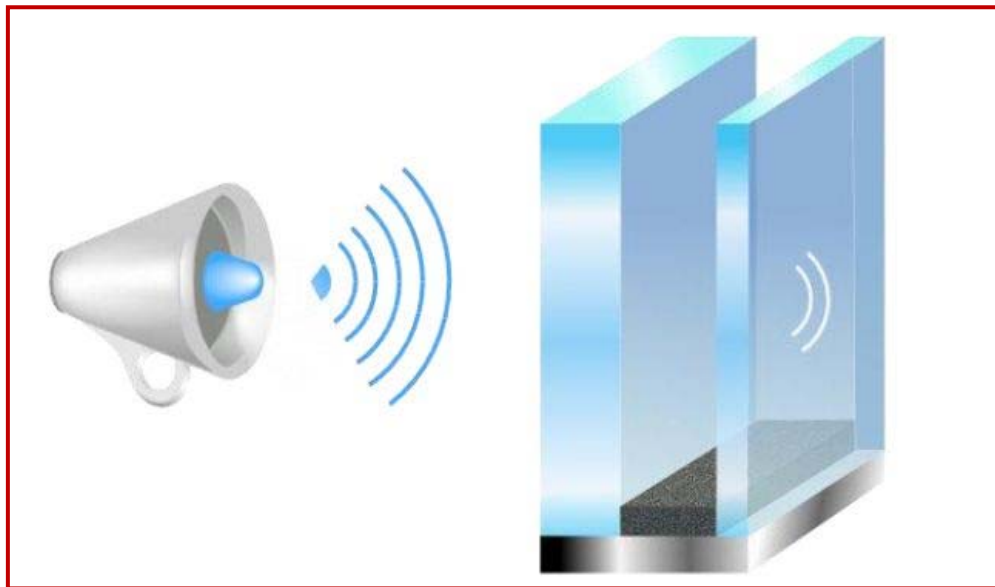


Fig. II.13 : Principe du double vitrage dissymétrique.

II.4.2.4 Le vitrage chromogène

Les vitrages chromogènes sont des vitrages à propriétés variables. Il existe des vitrages non électro-activés (sans induire un courant électrique) pour lesquels les conditions ambiantes déterminent le changement d'état (température, luminosité,...) et des vitrages électro-activés pour lesquels le changement d'état est induit par l'application d'un courant électrique, c'est-à-dire directement par l'action de l'utilisateur sur le vitrage. Nous décrirons brièvement les différents types de vitrages chromogènes.

1°) Les vitrages non électro-activés :

➤ *Le vitrage photochromique*

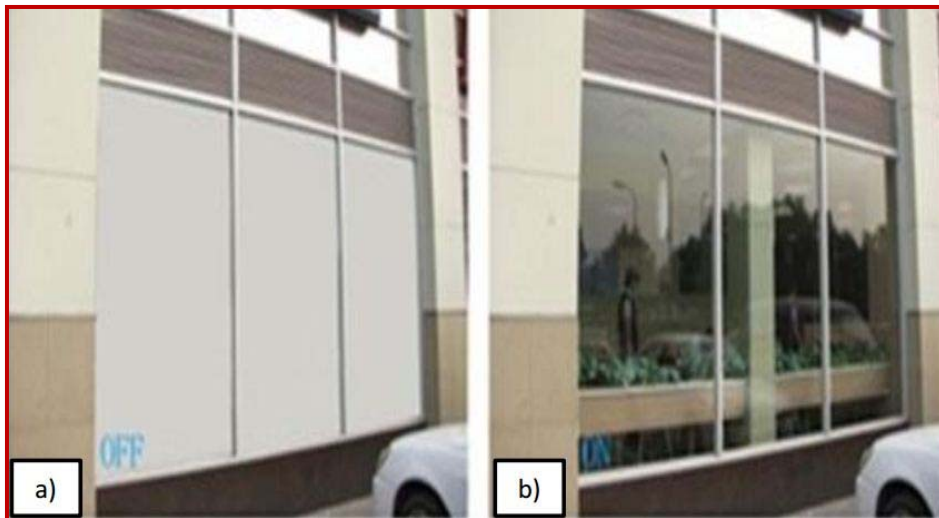


Fig. II.14 : Le vitrage photo chromique : a) vitrage opaque ; b) vitrage transparent

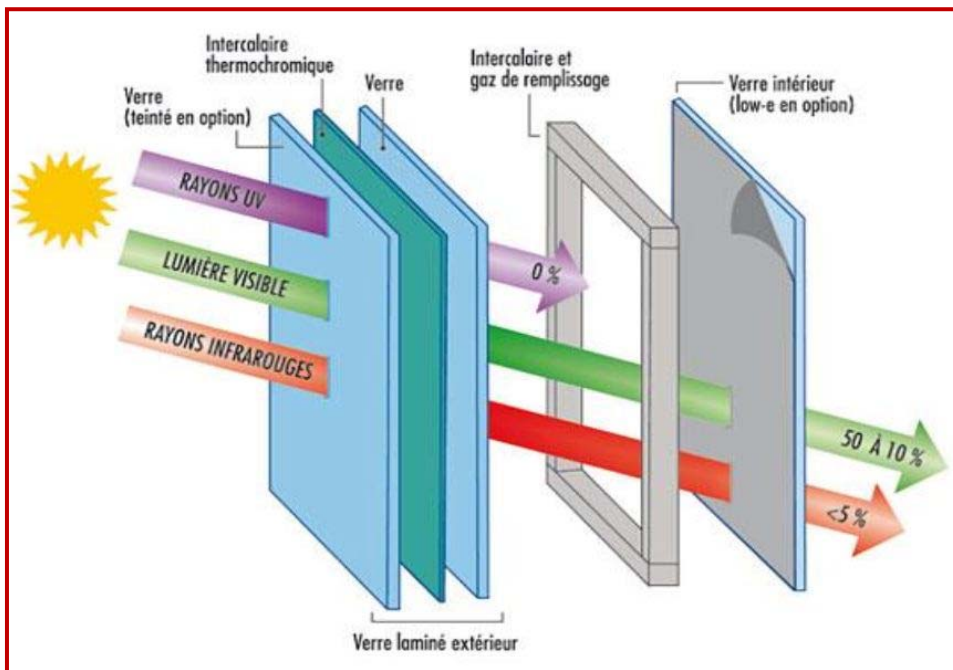


Fig. II.15 : Le vitrage thermo chromique



Fig. II.16 : Illustration d'un vitrage photochromique : teinte modifiée sous l'effet de la température extérieure.

2°) Les vitrages électro-activés :

➤ *Le vitrage à cristaux liquides*



Fig. II.17 : Vitrage à cristaux liquides.

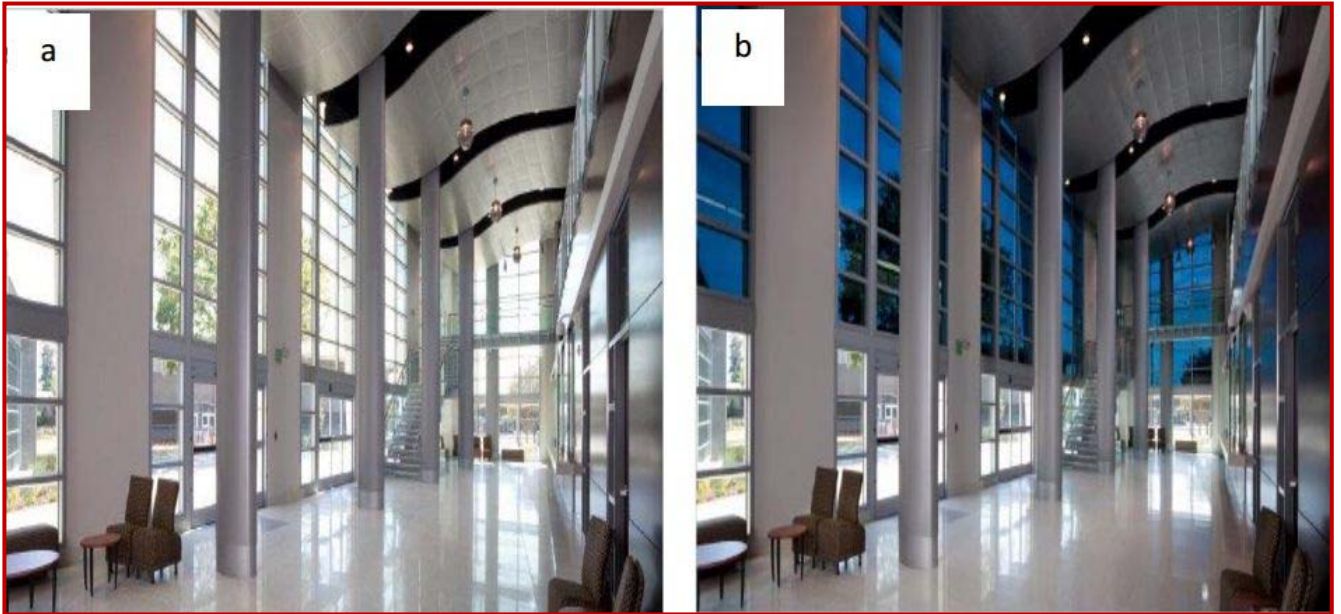


Fig. II.18 : Vitrage électro-chrome : (a) état claire, (b) état teinté.

II.4.2.5 Le verre autonettoyant

Il est composé d'un verre "Float" qui est recouvert d'une couche très fine d'un matériau minéral hydrophile et photo-catalytique, sur sa face extérieure. Ce type de vitrage a le même degré de transparence que son équivalent classique.

Les deux principes :

- **La photo catalyse**
- **L'hydrophylie**

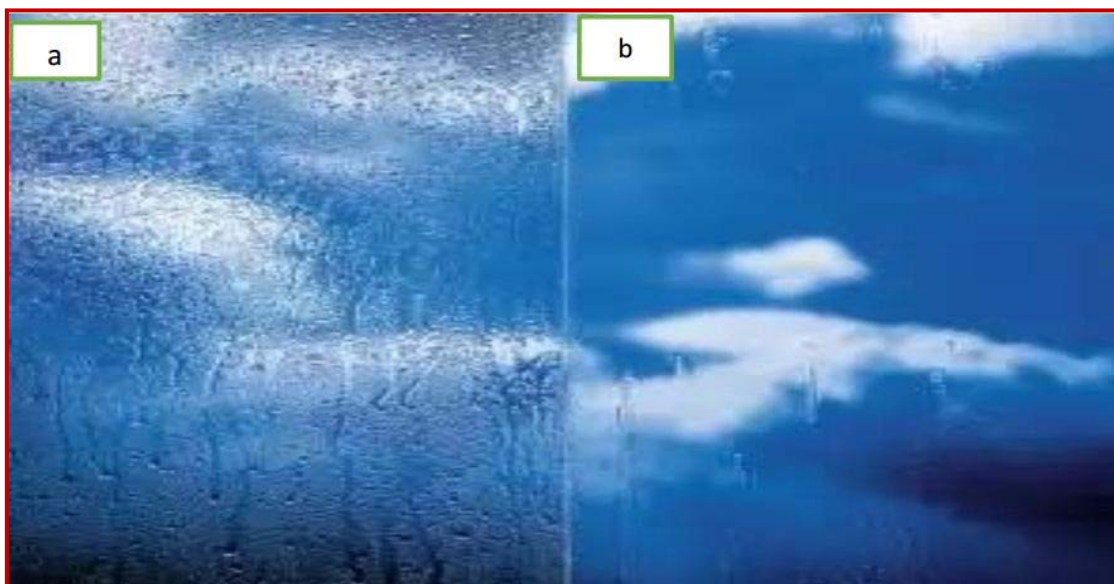


Fig. II.19 : Vitrage normale ; (a) vitrage autonettoyant (b) BIOCLEAR.

II.4.2.6 Le vitrage photovoltaïque

Les vitrages photovoltaïques sont des matériaux et dispositifs utilisant des panneaux de verre dit photovoltaïque (pouvant être plus ou moins transparent ou coloré) avec un double vitrage qui peut être incorporé pour obtenir une meilleure isolation thermique (voir figure II.22). Le verre laminé photovoltaïque est un vitrage solaire. Il permet de produire de l'électricité à partir d'une partie du spectre visible ou non visible de la lumière solaire. Il empêche également l'entrée des rayons UV nocifs ainsi que la radiation infra rouge. Ces techniques sont encore émergentes [31]. Normalement, elles sont composées d'une enveloppe en verre laminé photovoltaïque de 6, 8, 10, 12 ou 19 mm d'épaisseur, d'une chambre à air de 16 mm d'épaisseur afin d'optimiser l'isolation thermique, et d'une plaque de verre classique à l'intérieur de 6 mm d'épaisseur. De plus, pour améliorer la capacité isolante de la chambre, l'air intérieur peut être remplacé par du gaz (Argon).



Fig. II.20 : Vitrage photovoltaïque transparente.

II.4.2.7 Le vitrage pour une protection solaire

La fonction d'un verre de protection solaire est de filtrer une partie des rayons du soleil qui l'atteignent. Le choix du système de protection solaire est multiple ainsi que certains dispositifs selon que la protection soit de l'intérieure ou de l'extérieure.

➤ Cas du verre antisolaire avec film/teinté :

Il permet d'empêcher la plus grande proportion possible d'énergie solaire dans une pièce.

- **les films non réfléchissants clairs ou teintés** : de nombreux films destinés à la sécurité des biens et des personnes sont des films clairs. D'autres, destinés à la protection de l'intimité ou la réduction de l'éblouissement, sont teintés ou traités en surface avec un adhésif coloré[3].



Fig. II.21 : Type de verre teinte antisolaire.

II.5 Les différentes étapes de production du verre

II.5.1 Le mélange des matières premières

Sable. Calcaire et carbonate de sodium sont les composants majeurs du verre. Ces composants peuvent être remplacés par du calcin-verre collecté, trié et nettoyé. Les matières premières sont mélangées selon des proportions soigneusement définies. Le mélange est ensuite déversé dans le four.

II.5.2 La fusion :

Le four est composé d'une cuve dans laquelle le mélange sableux est fondu à très haute température, entre 1300°C et 1550°C.

II.5.3 Le moulage :

Le verre liquide est soufflé dans un moule "finisseur" placé sur la machine qui fabrique les bouteilles.

II.5.4 La recuisson :

Le verre doit être refroidi des conditions spéciales pour éviter les écarts trop brusques de température qui rendaient la bouteille fragile ; c'est le recuit réalisé dans un deuxième four de recuisson.

II.5.5 La finition :

Après une inspection visuelle les produits vitreux sont emballés sur palettes.

II.6 Exemple d'application

II.6.1 Les différentes étapes de production du verre étiré (flotté)

Après 1900, Emile Fourcault, de nationalité belge, a réussi à développer un procédé de fabrication du verre au cours duquel le verre était directement étiré à partir du verre liquide. Le procédé de fabrication du verre étiré fit l'objet d'un brevet en 1902. Mais ce n'est que plus de 10ans plus tard qu'il put être utilisé à l'échelle industrielle. Il permettait de fabriquer des plaques de verres fines totalement transparentes, sans nécessiter de polissage et d'égrisage.

C'est en 1959 qu'Alastair Pilkington, de nationalité anglaise, développa le procédé de fabrication du verre flotté. Ce fut le pas décisif vers un système de fabrication économique permettant de produire des plaques de verre de grande qualité dotées de surfaces absolument planes et parallèles. Le verre flotté est aujourd'hui le type de verre le plus utilisé.

Le verre flotté est fabriqué dans un long flux continu qui produit un raban de verre illimité et ininterrompu, qui peut atteindre chaque jour 30kilometres de long, en fonction de l'épaisseur du verre et de la capacité de l'installation. Toutes ces productions quotidiennes d'environ millier de tonnes de verre flotté sont ensuite transformées en verre traité, en verre isolant, en verre de sécurité et en d'autres produits encore.

II.6.2 Processus de fabrication du verre flotté

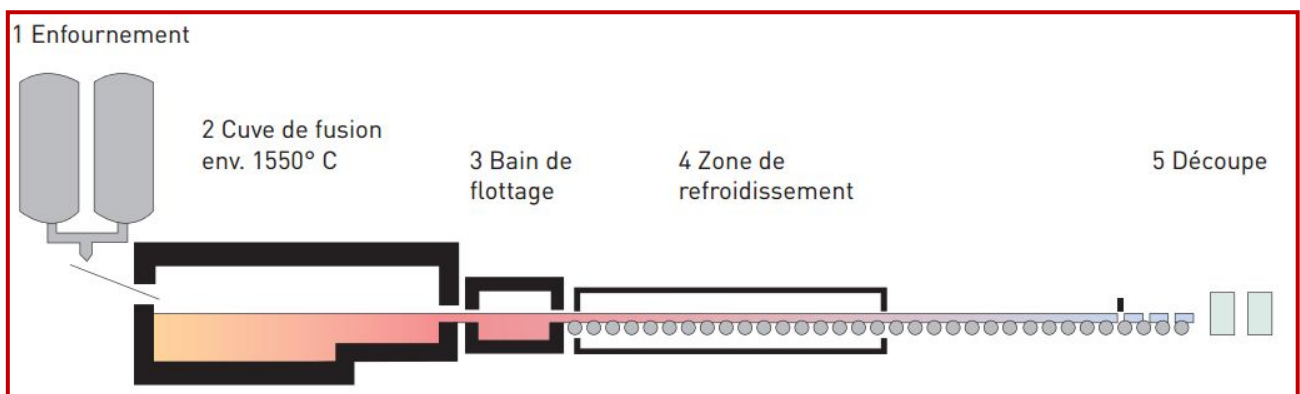


Fig. II.22 : Schéma de processus de fabrication du verre flotté

II.6.2.1 Enfournement

Le mélange est pesé et enfourné grâce a un système. Suivant les dimensions de la cuve, jusqu'à 12000 tonnes de matières premières sont ainsi enfournées chaque jour.

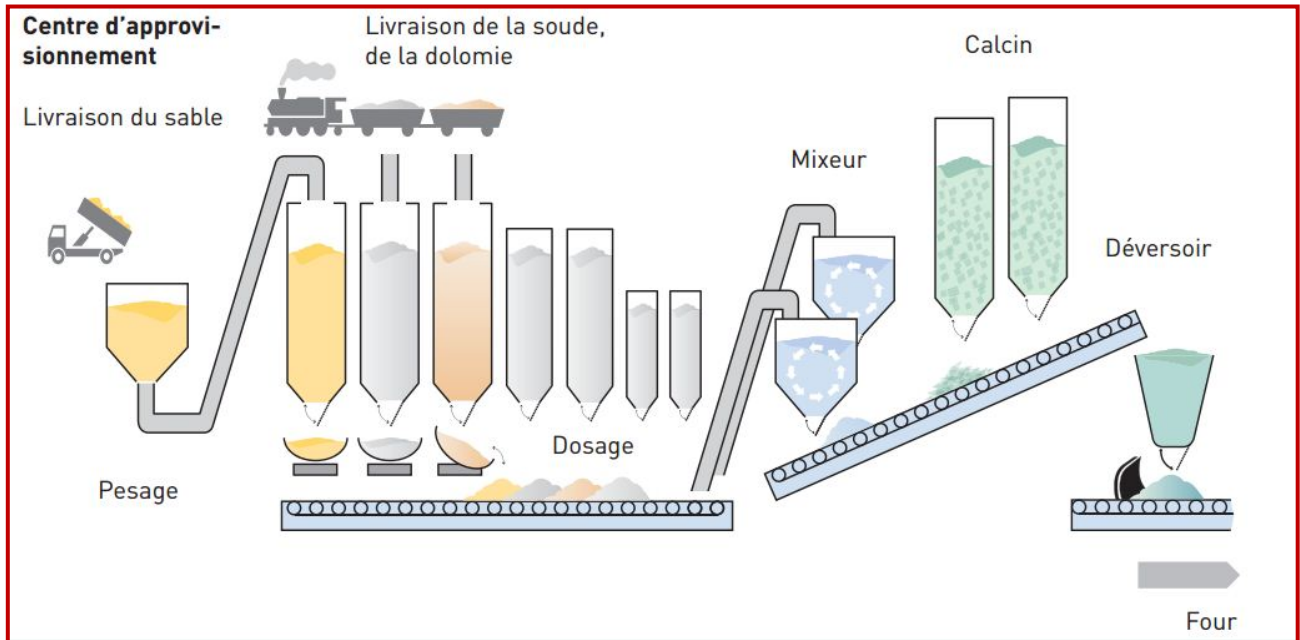


Fig. II.23 : Centre d'approvisionnement de l'unité de fabrication du verre flotté

II.6.2.2 Cuve de fusion

Le mélange est fondu dans la cuve à une température de 1550°C, puis il passe dans la zone d'affinage que le verre quitte à une température de 1100°C. la cuve de fusion contient en permanence jusqu'à 1900 tonnes de verre.



Fig. II.24 : Cuve de fusion (cite de production de verre flotté)

II.6.2.3 Bain de flottage

Le verre liquide est dirigé sur un bain d'étain liquide. Le fait de flotter librement sur la surface absolument plane du bain d'étain allié à un chauffage simultané de la surface supérieure (poli naturel) permet d'obtenir une feuille de verre aux faces parallèles, similaire à un miroir. Des rouleaux, appelés Toprolls, permettent de définir l'épaisseur du verre. L'épaisseur d'équilibre (c.-à-d. l'épaisseur de verre obtenue sans intervention extérieure) est de 6 mm. Pour obtenir une épaisseur inférieure, le déplacement de la masse de verre visqueuse doit être accéléré. Pour obtenir une épaisseur supérieure, il doit être ralenti.

II.6.2.4 Zone de refroidissement

Après le bain d'étain, le ruban de verre passe dans le couloir de refroidissement dont la longueur dépasse 100 mètres. Il est refroidi d'environ 600 à 60°C. Ce refroidissement lent et contrôlé évite toute formation de tensions internes. C'est un élément important dont dépend la qualité du traitement ultérieur.

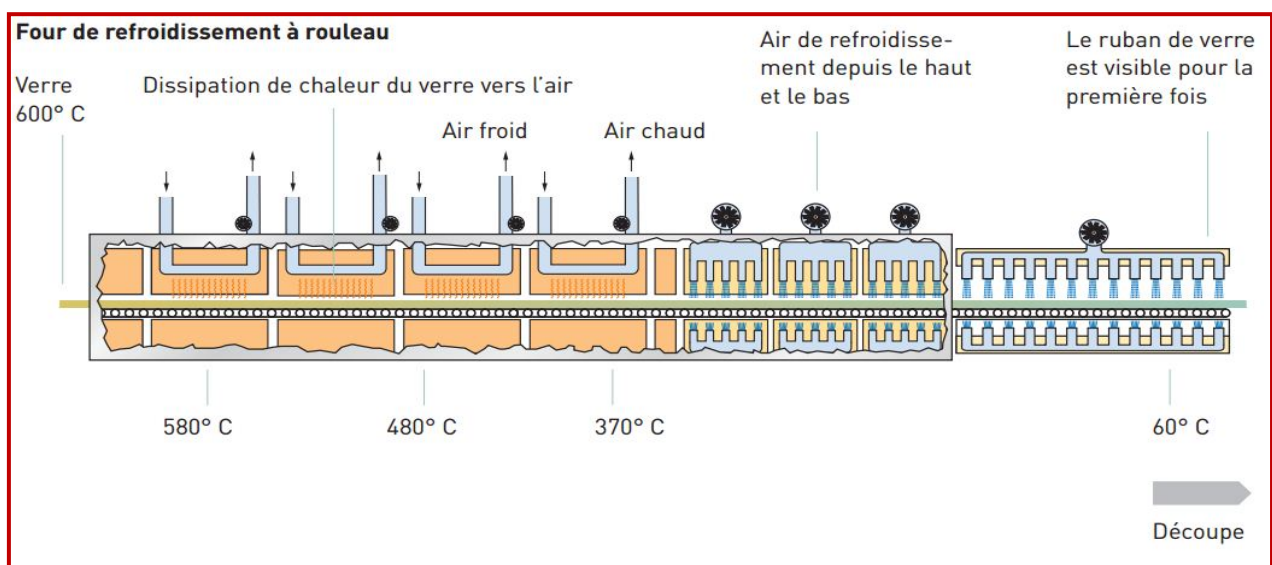


Fig. II.25 : Four de refroidissement à rouleau

II.6.2.5 Découpe

La dernière section de la ligne de production est appelée « extrémité froide ». Elle comprend le contrôle qualité de la découpe. Le ruban du verre est contrôlé en continu à l'aide de rayons laser afin de déceler la plus petite imperfection. Il est rare de pouvoir déceler à l'œil nu les zones ne répondant pas aux exigences. Le verre est ensuite débité et empilé, en plaques standards de 6000x3210 mm. Le verre peut également être directement préparé aux dimensions souhaitées par le client à l'aide d'une ligne de coupe séparée. En

400 m environ, des matières premières naturelles ont donné naissance à du verre flotté, prêt à être livré et prêt à être traité.

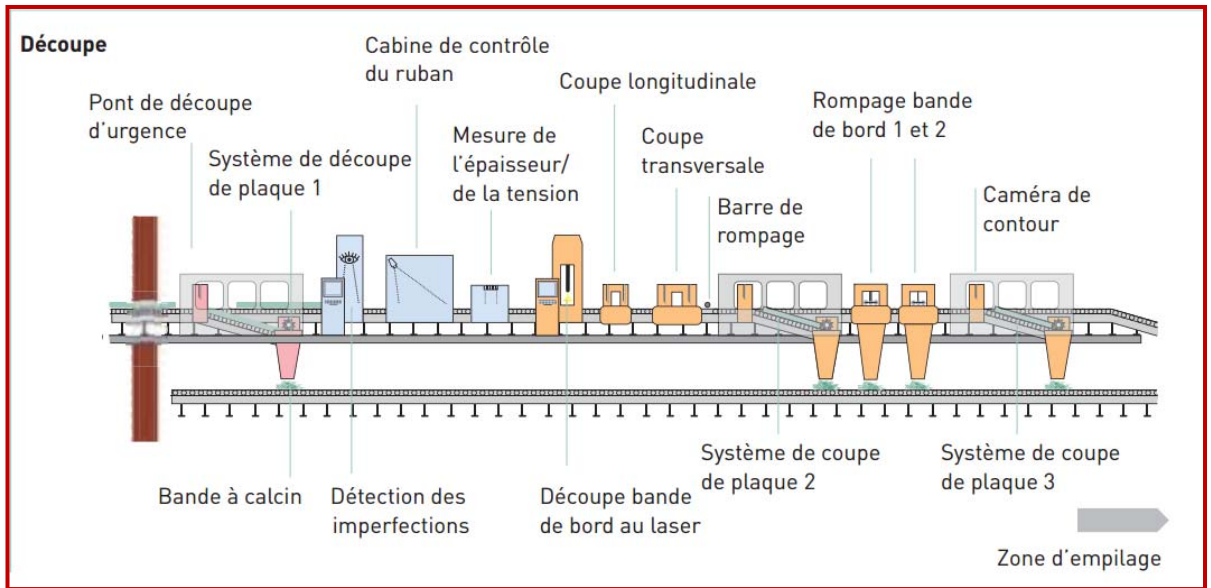


Fig. II.26 : Découpe des plaques de verre



Fig. II.27 : plaques de verre de 9m ; et zone des stocks

II.6.3 Principale matières premières pour la production du verre flotté

Matière première	En pourcentage du poids
Sable siliceux	~ 60%
Soude	~ 19%
Dolomie/chaux	~ 15%
Autres matières premières	~ 6%
Pls ajout de calcin propre	~ 20%

Tableau II.2 : Principale matières premières pour la production du verre flotté.

II.6.4 Résumé des principales caractéristiques techniques du verre flotté

Propriété	Symbole	Valeur chiffrée et unité
Densité (à 18° C)	ρ	2500 kg/m ³
Dureté	6 unités (selon Mohs)	
Module d'élasticité	E	7×10^{10} Pa
Coefficient de Poisson	μ	0,2
Capacité thermique spécifique	c	$0,72 \times 10^3$ (J/kg x K)
Coefficient d'allongement linéaire thermique moyen entre 20 et 300° C	α	$9 \times 10^{-6}/K$
Conductibilité thermique	λ	1 W/mK
Indice de réfraction moyen dans la plage visible (380 à 780 nm)	n	1,5

Tableau II.3 : principales caractéristiques techniques du verre flotté.

II.6.5 Divers traitements sur le verre flotté

Le verre flotté subit ensuite divers traitements pour devenir :

- Du verre isolant
- Du verre feuilleté de sécurité(VSG)
- Du verre de sécurité trempé (ESG)
- Du verre à isolation thermique.
- Du verre de protection solaire.
- Du verre de protection incendie.
- Des miroirs.
- etc.

Il est également utilisé comme base pour la réalisation

- De façades, des fenêtres, de devantures de magasin et de toitures
- De vitrines d'exposition et d'autres meubles en verre
- D'aménagements intérieurs dans le cadre de magasins ou d'appartements.

II.7 Propriétés physique et chimiques du verre

II.7.1 Définition et composition

Le verre que nous utilisons aujourd'hui comme matériau de construction est appelé verre sodocalcique en raison de sa composition. Lors de la fabrication, les matières premières sont chauffées. Au cours du processus de refroidissement qui suit, les ions et molécules n'ont pas la possibilité de s'ordonner. Le silicium et l'oxygène ne peuvent pas cristalliser. L'état désordonné de la molécule est ainsi « gelé ». Le verre est donc composé d'un réseau d'ions silicium(Si) et oxygène (O) enchainé irrégulièrement dans l'espace. Les vides sont occupés par des cations. Lorsque le verre est chauffé à 800-1000°C et que cette température est maintenue pendant un certain temps, un phénomène appelé dévitrification se produit. Des cristaux de silicium se détachent alors de la masse de verre. Cela donne du verre opaque laiteux.

Au sens chimique et physique, le verre n'est pas un solide, mais un liquide solidifié. Les molécules sont totalement désordonnées et ne forment pas de réseau cristallin. Cet état est souvent cité comme étant la raison de la transparence de ce matériau. Mais, il existe d'autres théories à ce sujet. Une d'entre elles relie la transparence au fait que l'oxyde de silicium est une combinaison très stable qui n'a pas d'électrons libres susceptibles de se télescoper sous l'effet du rayonnement lumineux.

Il n'existe pas de formule chimique pour le verre, car il se compose de différentes combinaisons. Le verre n'a pas de point de fusion, comme c'est le cas pour d'autres éléments comme l'eau qui est liquide au-dessus de 0° C et qui cristallise en glace en dessous de 0° C. Lorsqu'il est chauffé, le verre passe progressivement d'un état solide à un état visqueux, puis à un état liquide. La plage de températures entre l'état solide cassant et l'état visqueux plastique est souvent désignée par le terme plage de transformation. Pour le verre flotté, cette plage correspond à des températures de 520 à 550° C. En simplifiant, on peut en déduire une valeur moyenne (535° C) qui est désignée comme le point ou la température de transformation du verre (Tg).

II.7.2 Propriétés mécaniques

II.7.2.1 Résistance à la traction et résistance à la compression

Le verre tire sa dureté et sa résistance de sa base de silicate, mais également sa fragilité connue et indésirable. C'est une propriété à laquelle il faut dédier toute l'attention qui lui est due, quel que soit le type d'application.

Contrairement aux métaux, le verre n'a pas de plage plastique : il est élastique jusqu'à sa limite de rupture. La rupture est soudaine, sans signe préalable visible. La résistance à la compression du verre est très élevée et dépasse de loin celle des autres matériaux de construction. C'est pourquoi les problèmes sont rares lors du montage de vitrages sur un bâtiment.

La résistance à la traction est un facteur déterminant, en particulier la résistance à la flexion. Il est connu que les fibres de verre présentent une très bonne résistance à la traction. Mais il existe une très grande différence entre la résistance à la traction d'une fibre de verre et celle d'une plaque de verre. La résistance à la traction de la plaque de verre ne dépend pratiquement plus de la cohérence de la structure chimique, mais d'autres facteurs. En réalité, le verre n'est pas un corps compact plein, mais présente de nombreuses discontinuités, comme des imperfections de surface sous la forme de micro rayures et d'entailles. Ce sont elles qui au final déterminent la résistance du verre dans la pratique. Il est également important de noter que la résistance diminue en fonction de la durée d'application de la charge. C'est pourquoi, dans la pratique, différentes tensions admissibles sont prises en compte, en fonction de la durée d'application de la charge. Un exemple type de charge de courte durée est la charge due au vent, alors que les charges dues à la neige peuvent s'exercer pendant une plus longue période.

II.8 Les étapes de récupération du verre :

- 1- Tri du verre de l'habitat du reste de déchets
- 2- Collecte sélective des produits et transport vers un centre de traitement.
- 3- Tri final et broyage dans le centre de traitement.
- 4- Fusion des verres broyés.
- 5- Fabrication de nouveaux produits.
- 6- Remise dans le circuit de distribution.

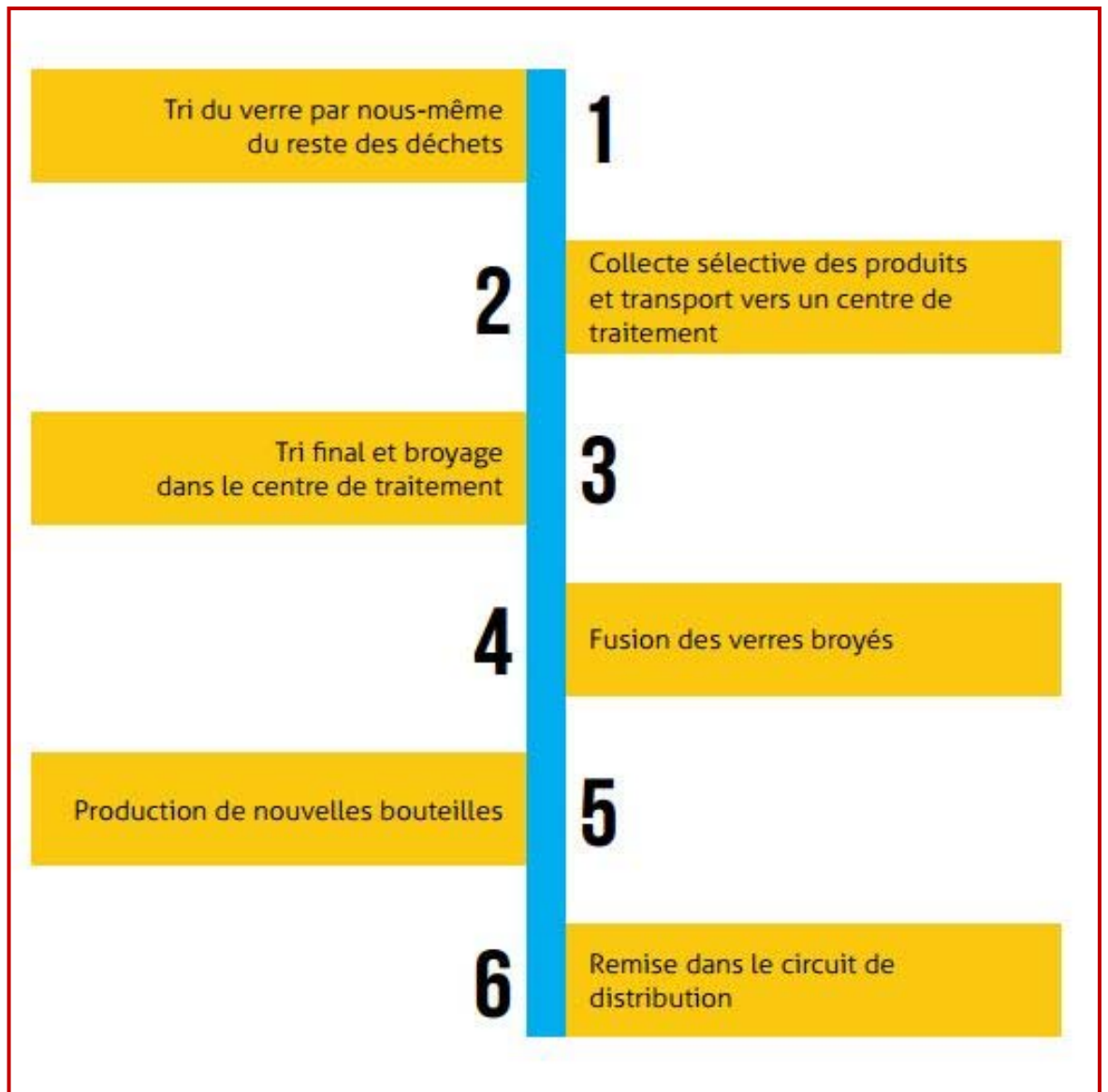


Fig. II.28 : Les étapes de récupération du verre.



Fig. II.29 : Le processus de recyclage du verre.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné un historique et une généralité sur les verres, composition, les différents types existant et la fabrication de verre depuis le mélange pesé et enfourné, fondu, puis coulé sur le bain ou moulé, après refroidissement dans des conditions spéciales on peut le coupée et le stocké.

Aussi on a parlé des étapes de récupération et recyclage du matériau verre.

CHAPITRE III

Usinage des verres



III.1 Introduction

Le façonnage des verres est le procédé le plus délicat à réaliser à cause du caractère réfléchissant, le moindre défaut, même minime, est visible. Ce chapitre traite des différentes méthodes d'usinage des verres. Dans un premier temps il définit le verre comme un matériau non-cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse : il est dur cassant. Il n'est pas usinable comme les matériaux ductiles (par exemple les métaux) en enlevant de la matière avec un outil coupant, mais uniquement par abrasion.

Qu'est ce qu'une abrasion ? C'est l'action qui consiste à réaliser des micros-cassures dans la matière, en faisant un apport d'abrasif libre sur un support en rotation.

Il faudra diminuer l'amplitude des micro-cassures par des étapes successives d'usure avec des abrasives de plus en plus fins, jusqu'à obtenir une surface polie.

III.2. Définition et principe de façonnage du verre :

III.2.1 Définition :

Façonnages « technique » : tous types d'applications, et plus particulièrement celles du verre, (verre structurelle, porte, parois de la douche, séparation des balcons, meuble, etc.)

Façonnages « décoratifs » : Cloisons et portes de douches ou de bains (mobilier, bureau, table, comptoirs, étagères), signalétique, etc.

III.2.2 Avantages

III.2.2.1 fonctionnalités :

- les façonnages des bords éliminent les irrégularités consécutives à la découpe du verre
- avant trempe, les chants des vitrages sont toujours façonnés.

III.2.2.2 esthétique et design

Souligner l'esthétique d'un verre : façonnage périphérique d'un plateau de table, de comptoir, étagères. Enrichir et personnaliser une réalisation : sablage d'un motif ou d'un logo sur des portes et des cloisons, gravure d'un miroir, découpe d'un plateau de table selon des formes complexes.

III.2.3 Principe d'usinage de verre

On classe généralement dans le façonnage du verre les opérations effectuées sur les objets en verre après qu'ils ont été mis en forme à la sortie du four de fusion et soumis à la recuisson.

Cependant certains produits en verre, et notamment le verre plat (glace, verre à vitre, verre coulé) et les tubes, sortent de l'usine en format standard de grandes dimensions et doivent être avant tout façonnage séparés en éléments correspondant chacun à un objet (une vitre, un pare-brise, un tube d'une longueur déterminée). C'est la découpe.

Celle-ci est le plus souvent effectuée à l'aide d'une molette en acier au tungstène ou d'un diamant que l'on appuie sur le verre pour y tracer le contour désiré. Quelques chocs appliqués sur la face opposée à la découpe au moyen d'un manche de l'outil, développent les fissures amorcées par ce dernier et la découpe est ensuite achevée en provoquant une flexion de part et d'autre du tracé. S'il ne s'agit pas d'une simple coupe rectiligne on supprime les fragments de verre restant à éliminer par flexion ou à la pince à gruger.

Pour des dalles d'une certaine épaisseur l'emploi d'une scie rotative à couronne abrasive assure une découpe régulière. Le tronçonnage des tubes se fait également par traçage au diamant, sur le tube en rotation, de la découpe à effectuer et en libérant par un léger choc et le tronçon ainsi préparé. Certains façonnages sont effectués dans les verreries, les autres par les façonniers spécialisés (miroitiers, souffleurs de verre au chalumeau, opticiens, lunetiers, vitraillistes...) ou par les industries utilisatrices.

Le façonnage peut se faire de deux façons :

- A froid par traitement de la surface des objets en verre sans déformation de masse vitreuse, par enlèvement de matière.
- A chaud par déformations de tout ou partie de la masse de l'objet en verre préalablement rendu malléable par une forte augmentation de température uniforme ou localisée. Une des techniques les plus spectaculaires est appelée fusing, que certains artistes appliquent à des objets ambitieux.

Après découpe aux dimensions d'utilisations, le verre subit un traitement mécanique ou manuel à froid destiné :

- à améliorer sa fonctionnalité,
- à souligner son aspect,
- à le personnaliser.

Différents façonnages sont possible : façonnage des bords (chants), découpe en formes, perçages d'encoches et de trous, sablage, gravure, ... etc.

III.3 Différents usinage de verre

III.3.1 L'usure par frottement

L'arrachage progressif des particules de verre qui caractérise ce procédé est obtenu par le frottement rapide et répété, ou par projection brutale, sur la surface à traiter de matières dures appelées « abrasifs ».

Les principaux abrasifs utilisés dans le cadre de l'usure par frottement sont le sable, le grès, l'émeri, le carborundum, le diamant. Ce dernier étant le plus efficace mais aussi de loin le plus coûteux. Le choix entre ces différents produits dépend de la nature des travaux à exécuter et de leurs prix de revient très différents les uns des autres.

L'agressivité, et donc l'efficacité, des abrasifs dépendent de plusieurs éléments :

- leur dureté superficielle ;
- la pression qu'on leur fait exercer sur le verre ;
- la vitesse de frottement réalisée, qui joue un rôle capital.

Une autre caractéristique importante des abrasifs utilisés est la grosseur de leurs grains. C'est pourquoi chaque opération d'usure superficielle peut comporter trois étapes :

- un dégrossissage, ou ébauchage, pour lequel on emploie des grains abrasifs d'une certaine grosseur ;
- un doucissage qui, à l'aide de grains beaucoup plus fin, permet d'aplanir la surface en la rendant régulière mais dépolie ;
- un polissage employant des grains d'une extrême finesse (généralement de l'oxyde de fer sous forme de potée, ou d'oxyde de cérium) qui donne à la surface traitée un aspect uniforme et restituent au verre sa transparence.

Les outils destinés à l'usure mécanique du verre sont généralement classés en grandes catégories qu'on peut ramener à trois :

1. Les meules : qui ont la forme d'une roue tournant autour de son essieu et peuvent attaquer le verre soit par leur face plane frontale soit par la jante.
2. Les outils de perçage : sortes de cylindres creux tournant sur eux-mêmes en s'enfonçant dans le verre par leur base circulaire.

3. Les fraises : qui englobent pratiquement tous les autres outils qui agissent le plus souvent sur des objets en verre à surface de révolution se trouvant fréquemment eux-mêmes en rotation.

Mais en fait on peut passer sensiblement de l'une à l'autre de ces catégories sans pouvoir fixer de frontières précises entre elles. Il n'y a pas de différence de principe, par exemple entre une meule utilisée pour dresser une surface plane, une fraise d'optique qui sert à réaliser des surfaces sphérique et une perceuse qui creuse un trou cylindrique dans une dalle de verre. La différence essentielle ne provient pas de l'outil (il s'agit en fait dans chaque cas d'un cylindre à parois plus ou moins épaisse attaquant le verre par sa base) mais des mouvements respectifs du verre et de l'outil l'un par rapport à l'autre (translation pour la meule, rotation pour la fraise, enfoncement la perceuse).

C'est donc par simple commodité de présentation qu'on adoptera ci-après le classement en meules, perceuses et fraises. On y ajoutera une quatrième catégorie, celle des petits outils de gravure, bien que ceux-ci, malgré les différences de fabrication et de dimensions, puissent être considérés comme des meules de tout petit format.

III.3.2 Outils de gravure à la roue (taille à la roue)

Il n'y a pas de limite précise entre la taille et la gravure. La taille comporte plus particulièrement des travaux d'usure superficielle qui s'apparentent au biseautage des glaces et à la réalisation de sillons décoratifs d'une certaine ampleur et de faible courbure.

La gravure a une action plus ponctuelle qui permet de creuser sur des objets en verre des sillons de toutes formes et de toutes dimensions, et elle peut aller jusqu'à la réalisation de véritable sculpture sur verre. Alors que la taille s'effectue sur des meules de plus grandes dimensions, la gravure exige des outils dont le disque abrasif comporte un diamètre plus petit (compris entre quelques millimètres et quelques centimètres).

La meule abrasive est remplacée par un disque ou molette formé d'une petite feuille de métal (cuivre ou plomb par exemple) que le graveur découpe et façonne lui-même. Il la fixe ensuite sur l'extrémité effilée de la broche qui transmet le mouvement de rotation provoqué par le tour.

Les dimensions réduites de l'outil qu'il emploie permettent au graveur de lui présenter l'objet à façonner dans toutes les positions nécessaires à la réalisation du décor souhaité et en respectant toutes les nuances et finesse du modèle proposé.

Il s'agit bien entendu d'un travail artistique très délicat pour lequel le graveur assure sa stabilité et sa liberté de mouvement en s'appuyant sur des accoudoirs judicieusement disposés.

III.3.3 Les abrasifs naturels

Le quartz : Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, le grès a été le seul matériau utilisé pour l'abrasion, on sait qu'il est formé de grains de quartz agglomérés par des sédiments naturels (dépôts qui se forment dans un liquide ou des substances sont en suspension), Sa dureté relativement faible (7 sur l'échelle de Mohs) et l'irrégularité de sa constitution le rendent impropre à la plupart des travaux de précision (**Tableau III.1**).

- L'émeri est composé de cristaux d'alumine dans une proportion variable (35 à 70 %) noyés dans une masse d'oxyde de fer et de silice. Les cristaux sont petits et un grain d'abrasif peut être composé de plusieurs cristaux. L'émeri est surtout utilisé pour la fabrication des meules de meunerie, de toiles et papiers abrasifs, il sert à des travaux de polissage.
- Le corindon naturel est une alumine cristallisée plus ou moins pure originaire d'Afrique du Sud, de Madagascar, du Canada. Sa richesse en alumine est parfois très élevée. (94 %) Sa dureté atteint 9 sur l'échelle de Mohs. Il est possible de l'agglomérer avec des liants céramiques.
- Le diamant est le plus dur des abrasifs connus (classé 10 sur l'échelle de Mohs). Il peut être aggloméré au moyen de résines, de métaux ou même d'argiles vitrifiables. L'emploi de ces meules s'est étendu dans l'industrie de verre, de la pierre, des matériaux semi conducteurs et des matières plastiques.

Dureté	Minéral	Composition chimique	Structure cristalline
1	Talc, friable sous l'ongle	$Mg_3 Si_4 O_{10} (OH)_2$	monoclinique
2	Gypse, rayable avec l'ongle	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	monoclinique
3	Calcite, rayable avec une pièce en cuivre	$CaCO_3$	rhomboédrique
4	Fluorine, rayable (facilement) avec un couteau	CaF_2	Cubique
5	Apatite, rayable au couteau	$Ca_5(PO_4)_3(OH-, Cl-, F-)$	hexagonale
6	Orthose, rayable à la lime, par le sable	$KAlSi_3O_8$	monoclinique
7	Quartz, raye une vitre	SiO_2	Trigonal
8	Topaze, rayable par le carbure de tungstène	$Al_2SiO_4 (OH-, F-)_2$	Orthorhombique
9	Corindon, rayable au carbure de silicium	Al_2O_3	rhomboédrique
10	Diamant, rayable avec un autre diamant	C	Cubique

Tableau III.1: Les dix minéraux de l'échelle de Mohs.

L'échelle de Mohs : fut inventée en 1812 par le minéralogiste allemand Friedrich Mohs afin de mesurer la dureté des minéraux. Elle est basée sur dix minéraux facilement disponibles. Comme c'est une échelle ordinale, on doit procéder par comparaison (capacité de l'un à rayer l'autre) avec deux autres minéraux dont on connaît déjà la dureté. Cette échelle n'est ni linéaire ni logarithmique.

III.3.4 Les abrasifs artificiels

Le corindon artificiel ou l'alumine : abrasif que l'on obtient en fondant la bauxite au four électrique et le carbure de silicium ou carborundum : préparé en soumettant au four électrique un mélange de charbon et silice.

III.4 Façonnage du verre

Après la découpe du verre, il est façonné pour améliorer sa fonctionnalité, le personnaliser ou souligner son aspect. Les façonnages sont divers :

- 1- perçages des trous ou encoches ;
 - 2- sablage ou gravure ;
 - 3- Façonnage des bords ;
- Façonnage décors.

III.4.1 Perçage des trous ou encoches

Le diamètre d'un trou est au moins égal à l'épaisseur (e) de verre (**Fig. III.1**).

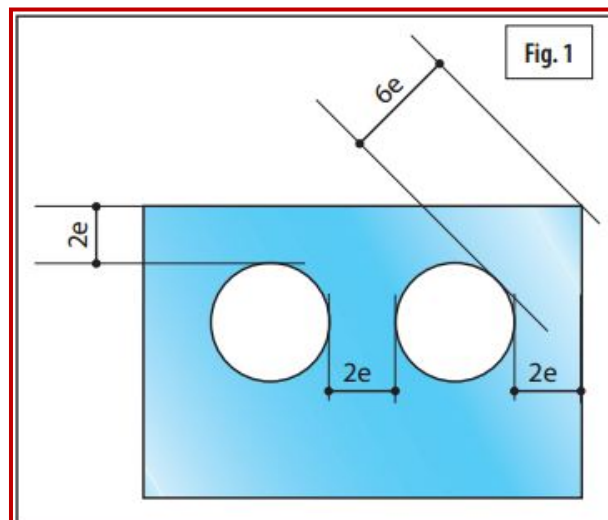


Fig. III.1: Perçage des trous de $\varnothing < 40\text{mm}$.

Trous de $\varnothing \geq 40\text{mm}$ (**Fig. III.2**)

Respecter les distances minimales du dessin

Par rapport à la largeur « l » du volume, le diamètre \varnothing (ou le cumul des \varnothing) et au plus égal à :

- 1/4 pour $e=6\text{mm}$;
- 1/3 pour $e=8, 10, 12\text{mm}$.

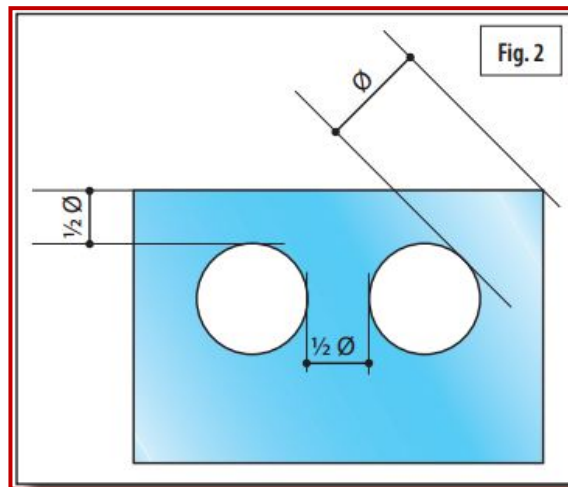


Fig. III.2 : Perçage des trous de $\phi \geq 40\text{mm}$.

Trous débauchés (**Fig. III.3**)

Trous de 16 ou 22mm reliés au bord par un trait de scie.

$5\text{mm} \leq d \leq 2^\circ$

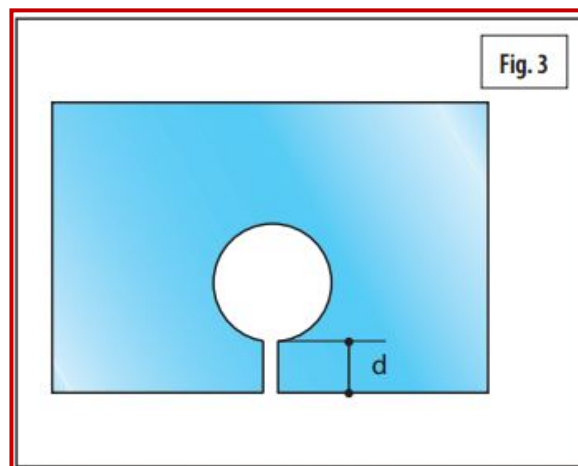


Fig. III.3 : Trous débauchés.

Trous rectangulaires ou carrés (**Fig. III.4**)

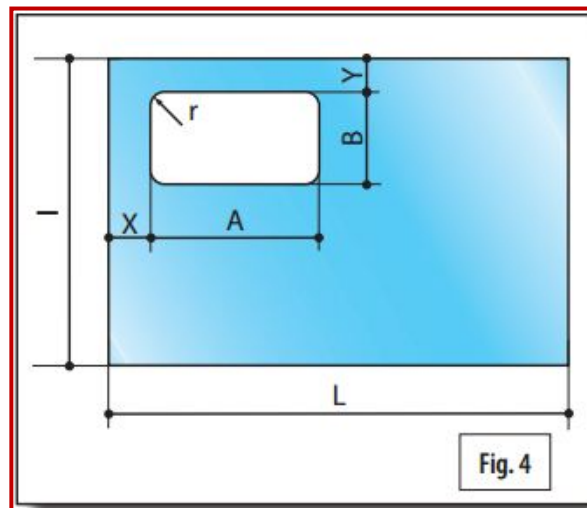


Fig. III.4 : Trou rectangulaire.

$$X > A/2 \quad Y > B/2$$

Pour vitrage trempé 6 mm : $A \leq L/4$ et $B < l/4$

Pour vitrage trempé 8 mm : $A \leq L/3$ et $B < l/3$

$R = 8$ ou 11 mm

Par « encoches » sont désignées non seulement les encoches (entailles sur le bord d'un vitrage), mais également un ou plusieurs trous.

Ex : « encoches 2X » (**Fig. III.5**)

Elles sont positionnées par rapport à l'angle ou par rapport à un bord de vitrage, et destinés à fixer des pièces métalliques.

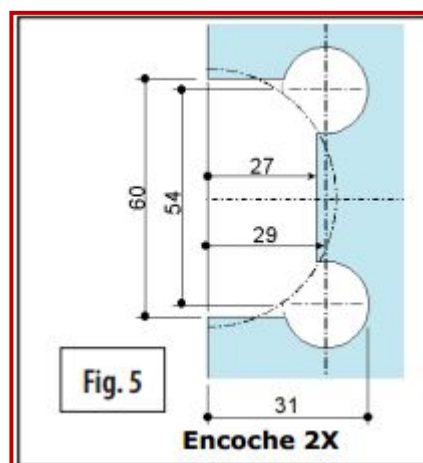


Fig. III.5 : Encoche 2X.

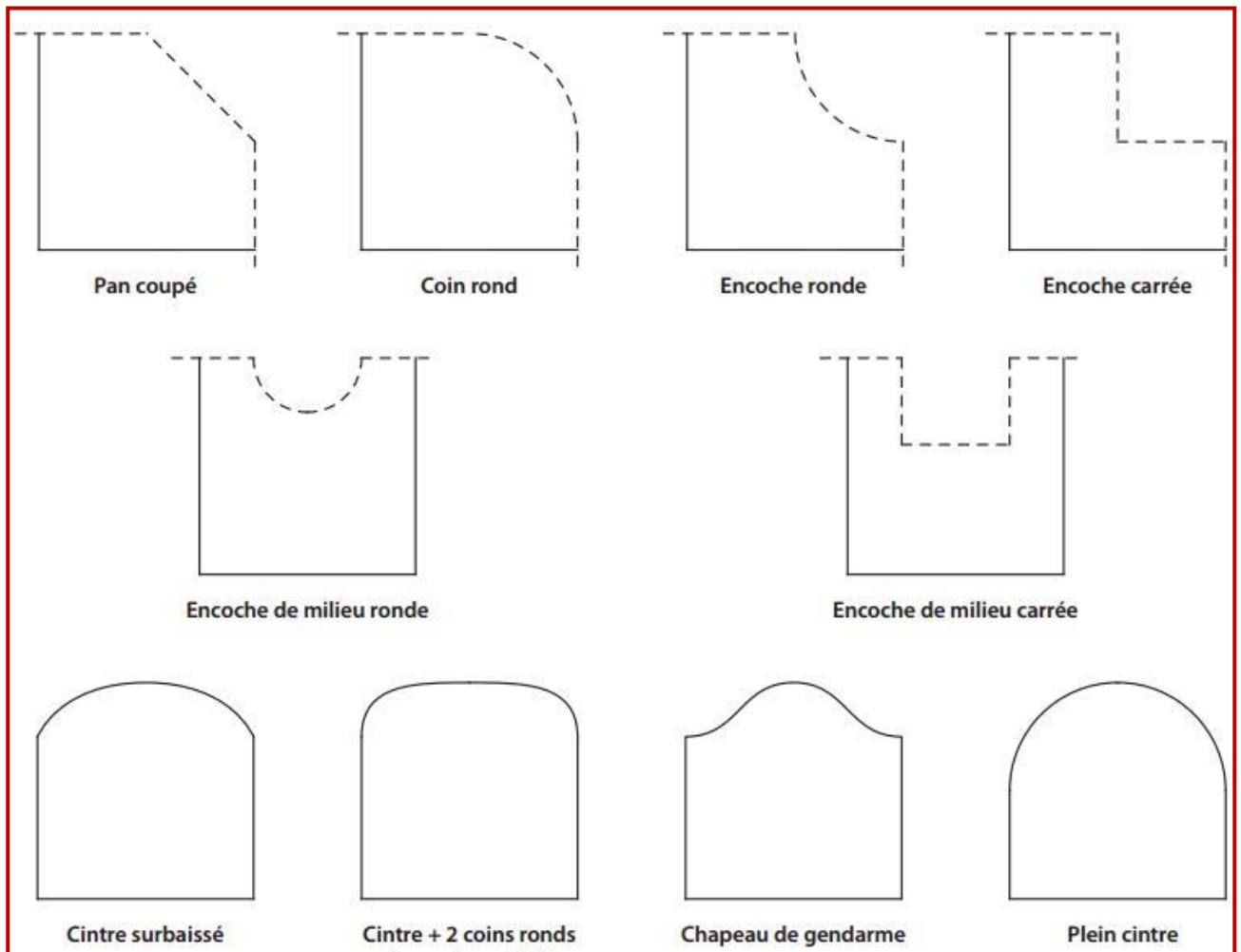


Fig. III.6 : Découpe en forme.

III.4.2 Sablage et gravure

Le décor mat est obtenu par projection de matériau abrasif sur la surface du verre, pendant le sablage, les parties qui doivent rester transparentes sont protégées par un masque.

La profondeur et la translucidité du sablage varient selon l'intensité de la projection et le type de matériau abrasif utilisé.

Le décor gravé est apporté par incision de verre.

III.4.3 Le Façonnage des bords

Il élimine les irrégularités consécutives à la découpe du verre et enlève le risque de se couper. Il accentue l'esthétique et le design du verre pour les usages suivants : plateaux de tables ou de comptoir, portes, tables basses, étagères, bureaux, miroirs, ...

Sur ce façonnage de verre les arrêtes du bord du verre sont abattues (c.-à-d. qu'elles ne sont plus du tout coupantes) de façon particulièrement soignée.

Le pourtour du verre restera lui complètement transparent, brillant et d'aspect impeccable. C'est la finition la plus sécurisée qui pour le maniement du verre.

C'est pourquoi nous l'avons privilégiée.

Cette finition ne peut être appliquée aux doubles vitrages. Ceux-ci resteront donc coupants sur le pourtour et nécessiteront, lors de leur manipulation, le port de gants adaptés.

On peut vous proposer différents traitement des bords :

III.4.3.1 Chant biseauté ou arêtes abattues(AA)

Les arêtes sont abattues

La tranche peut être rodée en totalité, en partie ou pas du tout

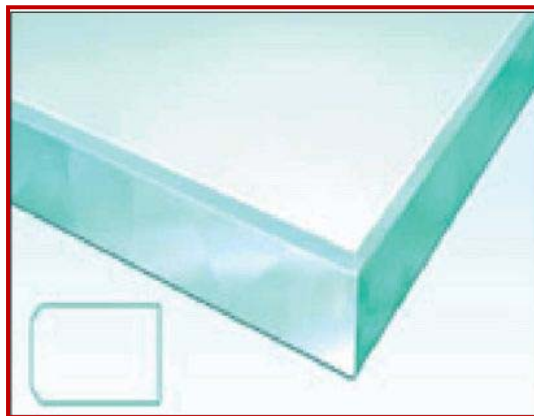


Fig. III.7 : Chant biseauté ou arêtes abattues.

III.4.3.2 Chant meulé ou joint plat industriel(JPI) ou rodé mat ou plat mat

Toute l'épaisseur du vitrage a subi le rodage à la meule. Il ne reste aucune trace de la surface de découpe originale sur la tranche

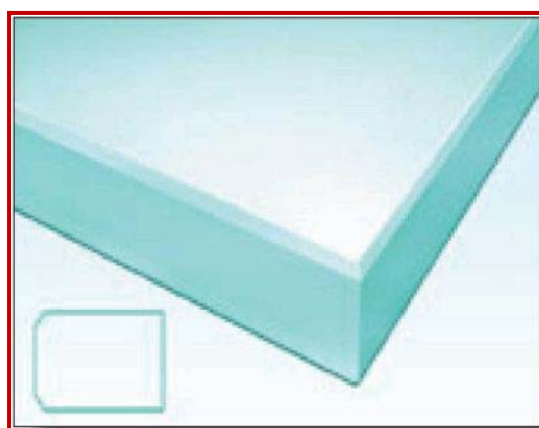


Fig. III.8 : Chant meulé ou joint plat industriel(JPI) ou rodé mat ou plat mat.

III.4.3.3 Chant meulé ou joint plat poli industriel(JPPI) ou rodé plat satiné

La tranche a subi un rodage avec meule fine.

Le travail de la meule est imperceptible à l'œil nu.

La tranche est mate (satiné).

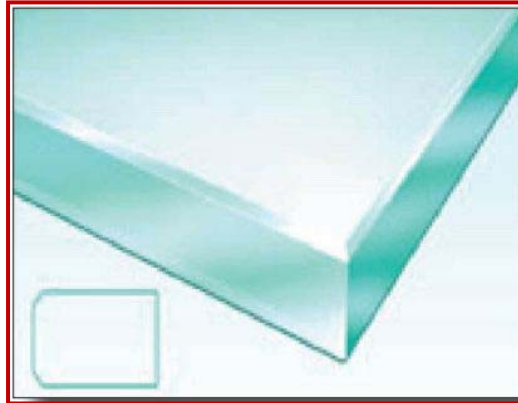


Fig. III.9 : Chant meulé ou joint plat poli industriel(JPPI) ou rodé plat satiné.

III.4.3.4 Chant poli ou joint plat poli(JPP) ou plat poli ou rodé poli

Après satinage, la tranche subit un polissage. Elle devient brillante.

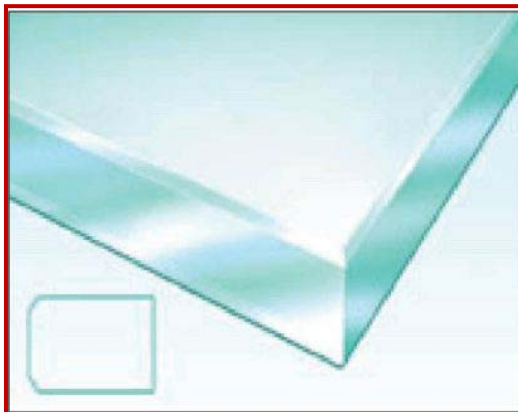


Fig. III.10 : Chant poli ou joint plat poli(JPP) ou plat poli ou rodé poli.

III.4.3.5 Chanfreins

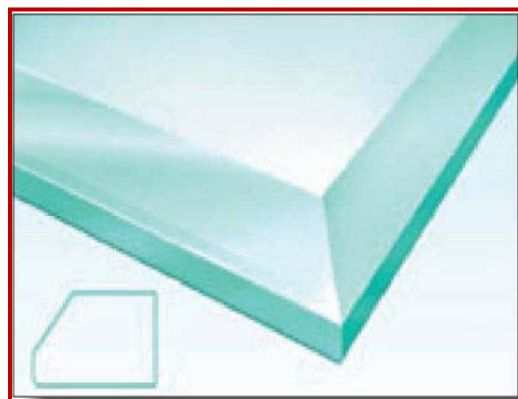


Fig. III.11 : Chanfreins.

III.4.4 Façonnage décors

Ils sont réalisés sur verre clair translucide, et sur miroir. Ils permettent de valoriser le décor et de souligner les contours du verre, en particulier pour les verres épais.

III.4.4.1 Joint arrondi (finition mate ou brillante)

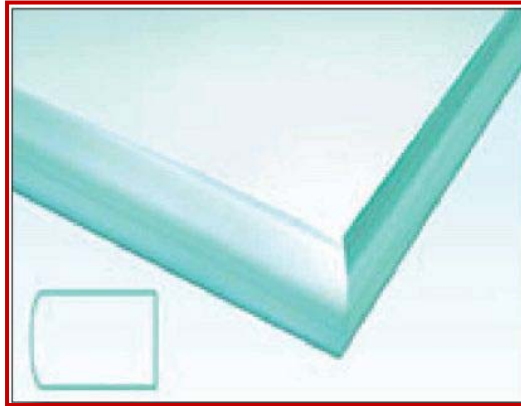


Fig. III.12 : Joint arrondi

III.4.4.2 Cascade (15 au 19 mm)

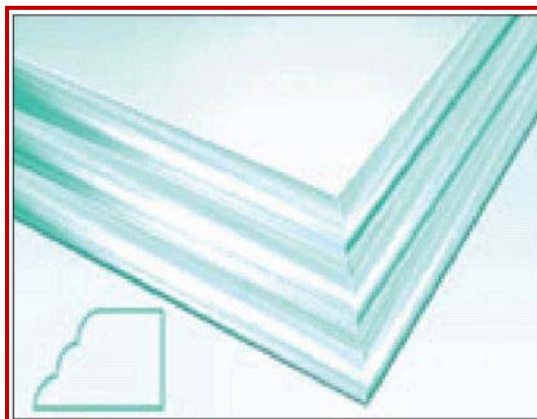


Fig. III.13 : Cascade.

III.4.4.3 Bec de corbin ou chapeau napoléon (15 au 19 mm)

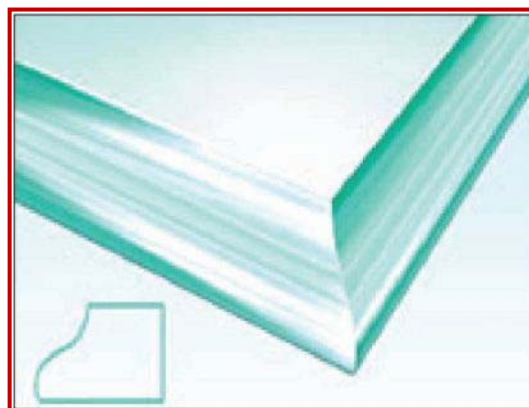


Fig. III.14 : Bec de corbin ou chapeau napoléon.

III.4.4.4 Chants grugés

Le chant du verre présente de larges écailles.

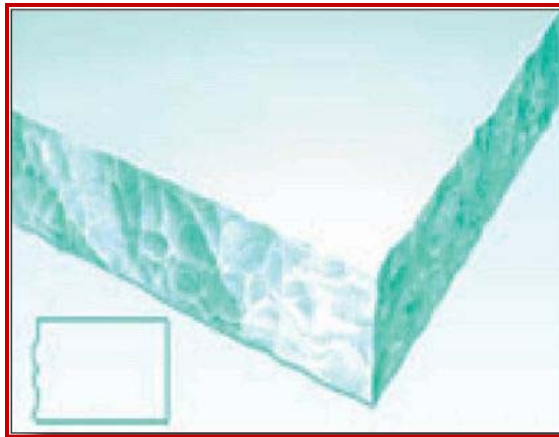


Fig. III.15 : Chants grugés.

III.4.4.5 Biseau

Le biseau est un façonnage qui est spécifique au verre. Il s'agit d'enlever sur la surface, à partir du bord et avec un angle faible, une petite quantité de matériau, puis de le polir.

C'est le façonnage le plus délicat à réaliser car, à cause du caractère réfléchissant, le moindre défaut, même minime, est visible

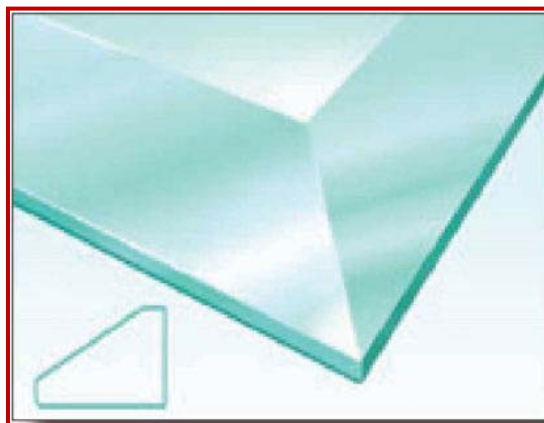


Fig. III.16 : Biseau.

III.4.4.6 Double biseau (épaisseur minimale = 8mm)

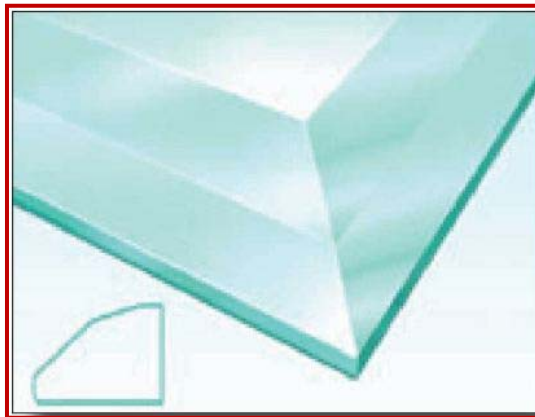


Fig. III.17 : Double biseau.

III.4.4.7 Biseau double face (épaisseur minimale = 8mm)

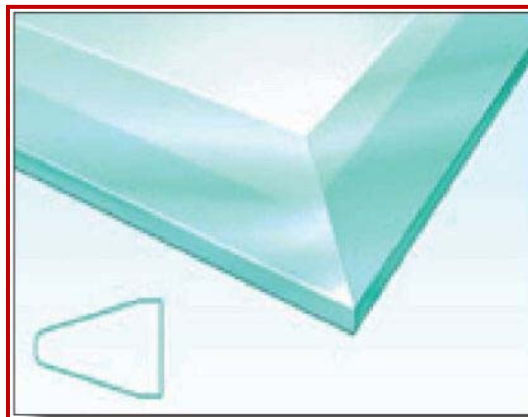


Fig. III.18 : Biseau double face.

III.5 Conclusion

Ce chapitre traite des différentes méthodes d'usinage des verres. Dans un premier temps il définit le verre comme un matériau non-cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse : il est dur cassant. Il n'est pas usinable comme les matériaux ductiles (par exemple les métaux) en enlevant de la matière avec un outil coupant, mais uniquement par abrasion.

Puis on a parlé du procédé de biseautage. Qui est un façonnage spéciale de verre, il s'agit d'enlever de la matière des bords des verres ou on peut réaliser des formes spéciales, décoratives qui élimine les irrégularités due à la découpe des verres, jusqu'à obtenir une surface polie.

CHAPITRE IV

Proposition d'un nouveau système de biseautage des bords de verre



IV.1 Introduction

Le biseau est un façonnage qui est spécifique au verre. Il s'agit d'enlever de la matière sur la surface, à partir du bord et avec un angle faible, une petite quantité de matériau, puis de le polir.

C'est le façonnage le plus délicat à réaliser sur ce matériau à cause du caractère réfléchissant, le moindre défaut, même minime, est visible.

La machine du biseautage ou usinage des bords de verre consiste à éliminer les irrégularités due à la découpe des verres, dans ce chapitre on va essayer de faire une étude et dimensionnement d'un dispositif de biseautage des bords de verre.

IV.2 Schéma cinématique du système biseautage

Ce schéma représente l'opération d'usinage du verre, moteur(1) qui fait tourner l'outil de biseautage, et moteur(2) qui fait avancer le chariot glissant par système pignon-crémaillère (Fig. IV.1).

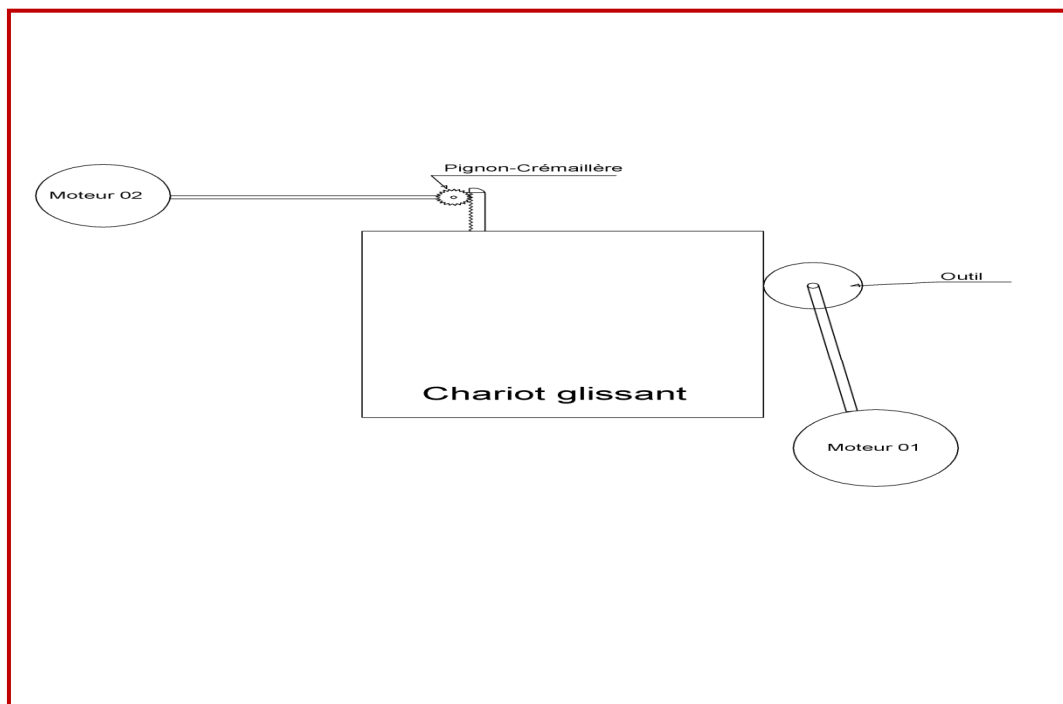


Fig. IV.1 : Schéma cinématique du système de biseautage.

IV.3 Différents composant d'une machine de biseautage

La figure représente une vue d'ensemble en perspective du dispositif proposé (Fig. IV.2).

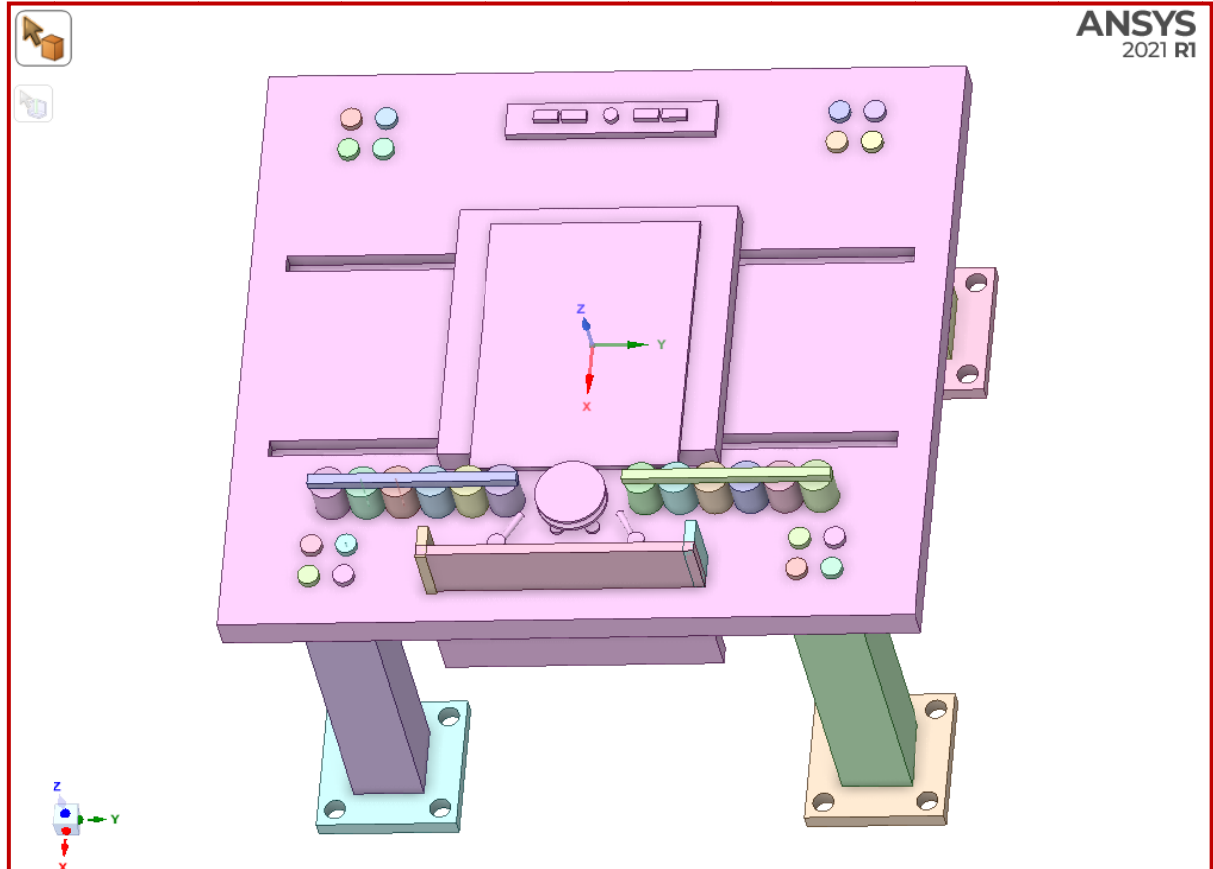


Fig. IV.2: Désigne de la machine de biseautage des bords de verre.

D'après cette figure, la machine de biseautage est composée de plusieurs parties qui sont :

IV.3.2 Table

Comme il est délicat l'usinage des bords des verres, pour l'opérateur de la machine ou pour le verre lui-même, qui peut provoquer des cassures au matériau il faut que la table soit rigide, On réalise cette table (Fig. . IV.3) en cadre de fer rectangulaire 100x50, de longueur de 2 mètre, et largeur de 1,20 mètre.

- Rôle de la table :
 - Assure une zone de travail sécurisée
 - Garanti une platitude et un niveau stable.

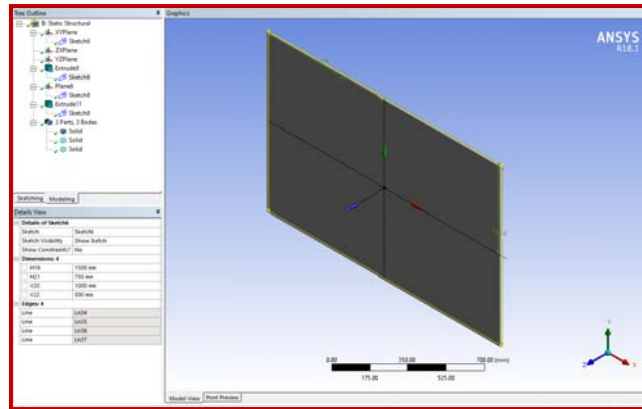


Fig. IV.3 : Table brut.

IV.3.2 Supports

Pour que l'usinage soit uniforme et bien fini, on fait le montage par boulon de la table avec des supports aussi rigide 150x100. Cette fixation nous assure le niveau et la stabilité de la machine de biseautage, aussi un montage et démontage simple (**Fig. IV.4**).

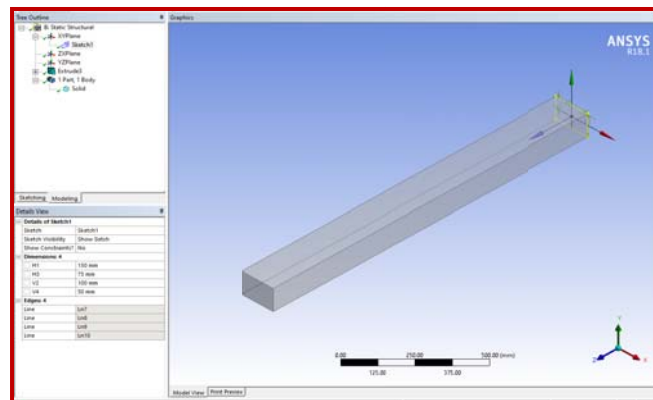


Fig. IV.4 : Support.

- Rôle des supports :
 - Assure une stabilité a la machine
 - Présente des appuis fixes et rigides.

IV.3.3 Système de biseautage

La partie essentielle d'usinage bords des verres est le système rotatif qui est composé d'un moteur électrique, outil de biseautage, support auxiliaire mobile, et système de fixation

IV.3.3.1 Moteur électrique

Le moteur électrique crée une rotation de l'outil de biseautage, ou le contact du verre dans l'horizontale et le mouvement rotatif de l'outil fait enlever l'irrégularité de la matière et fait réaliser l'opération de biseautage (**Fig. IV.5**).

Le moteur électrique est monté sur un support auxiliaire qui assure un mouvement vertical de l'outil de biseautage pour le permettre de déplacer verticalement, aussi le changement qui sera facile de l'outil.

Pour libérer l'espace à l'opérateur On a fait monter le moteur sous la table.

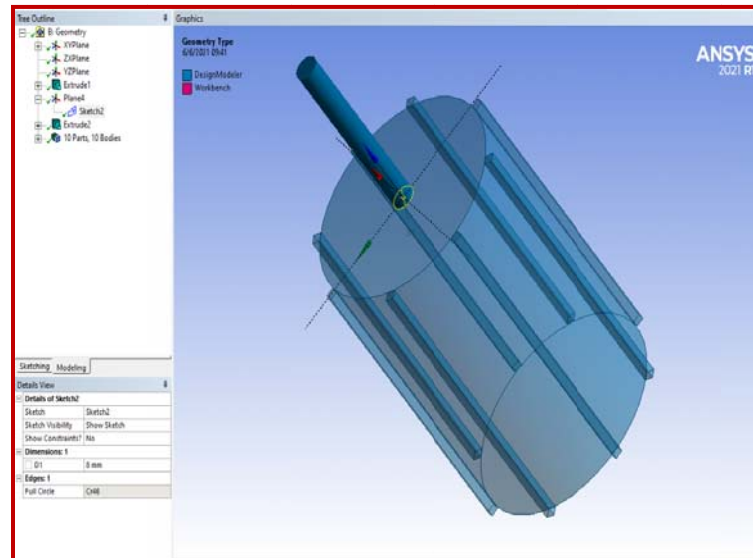


Fig. IV.5 : Moteur électrique.

Un moteur électrique asynchrone triphasé est choisit pour assuré l'opération de biseautage, ce moteur est bien choisi avec les caractéristiques suivante (**Tableau IV.1**) :

Marque et Type	Fréquence Hz	vitesse Tr/min	puissance KW	angle $\cos\phi$	rendement $\eta\%$	couple Y Δ V
O.E.D MOT3	50	840	2,2	0.85	80	230- 400

Tableau IV.1: Caractéristique technique du moteur électrique.

- Rôle du Moteur électrique :
 - Présente une partie essentiel dans le procédé de biseautage ;
 - Assure le mouvement rotatif de l'outil de biseautage

IV.3.3.2 Outil de biseautage

IV.3.3.2.1 Description des outils de biseautage :

Pour faire le biseautage, il y'a une grande gamme des outils qui présente les différentes opérations d'usinage (**Fig. IV.7**)

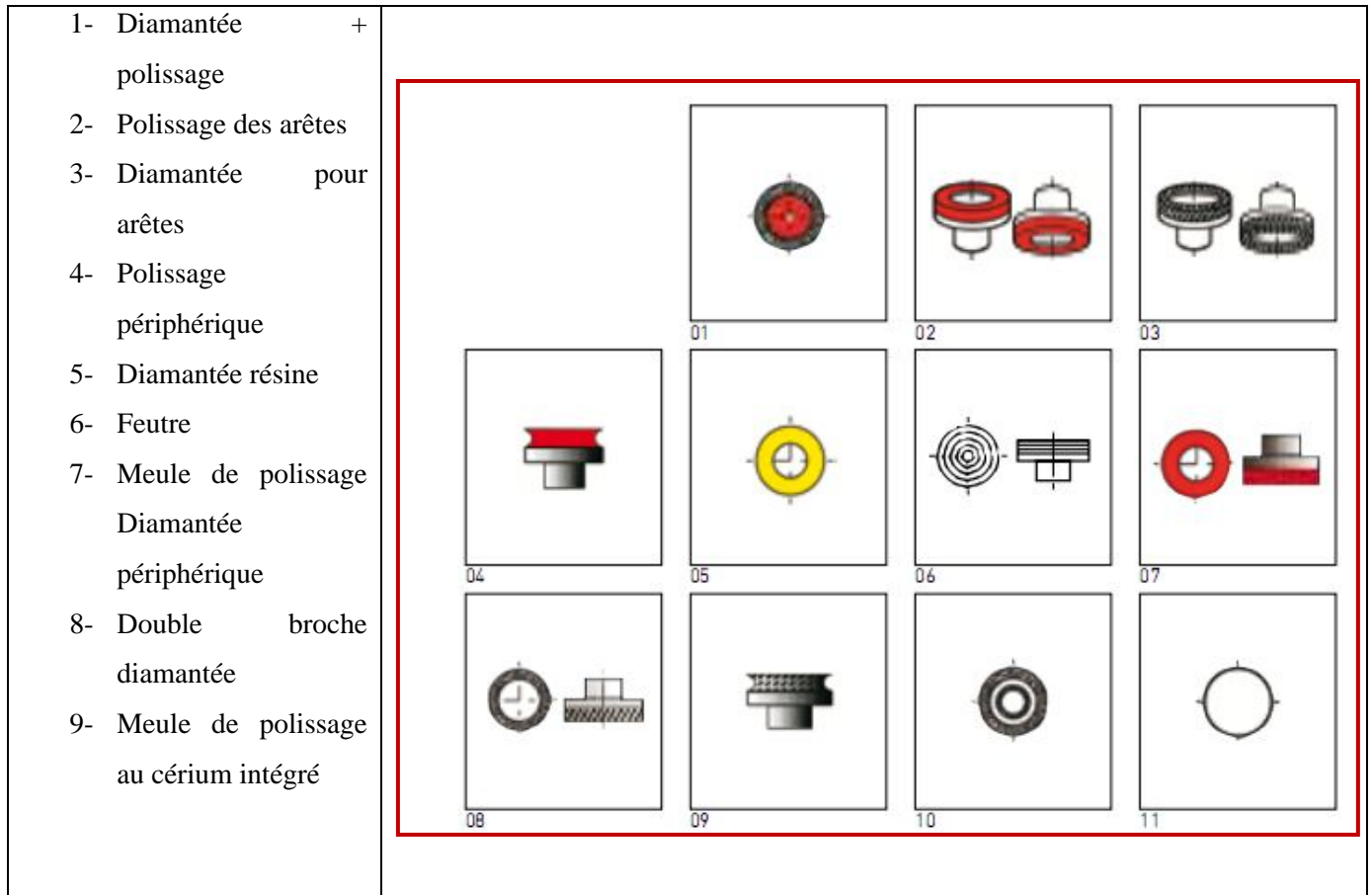


Fig. IV.6 : Description des meules.

IV.3.3.2.2 Montage de l'outil de biseautage (exemple d'application):

L'outil de biseautage est fixé sur l'axe de rotation, et peut déplacer dans le vertical pour le montage-démontage lors du changement de l'outil et même pour les différentes épaisseurs du verre (**Fig. IV.6**).

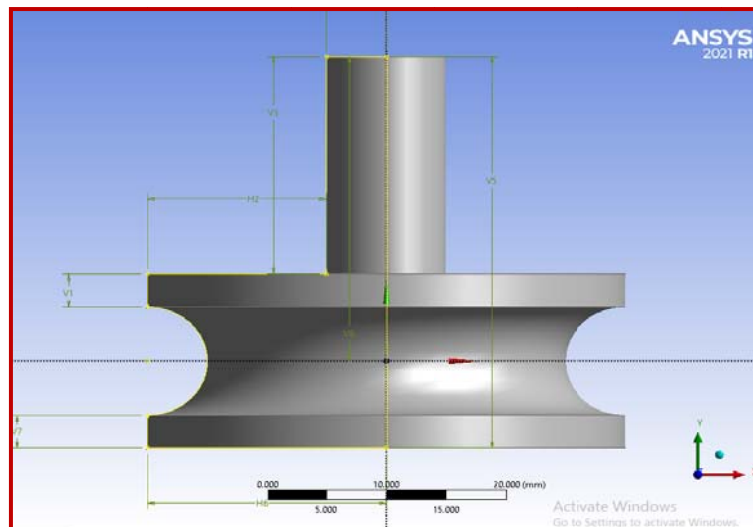


Fig. IV.7 : Outil de biseautage.

L'attaque du verre par l'outil peut se produire en trois façons :

- 1- l'outil peut être directement abrasif : soit taillé dans une pierre naturelle agressive comme le grès et l'émeri ; soit artificiellement formé par l'agglomération de grains d'abrasif séparés plus ou moins gros (grès, émeri, carborundum) soit formé d'une ossature métallique sur laquelle est appliqué et fixé, sur les seules parties de sa surface appelées à attaquer le verre, un revêtement formé d'une concrétion diamantée (poussière plus ou moins fine de diamant agglomérée au moyen d'un liant très résistant qui peut-être au besoin du bronze ou de l'acier...).
- 2- il peut être utilisé pour user le verre sans être directement abrasif : il est alors généralement en fonte et entraîne dans son mouvement de rotation des grains de sable plus ou moins fins en suspension dans de l'eau que l'on insère entre lui et l'objet en verre à attaquer et auxquels revient le rôle d'abrasifs (il porte alors le nom de lapidaire, platine ou rondeau).
- 3- il peut être enfin utilisé pour le polissage : Il ne s'agit plus alors d'user le verre, qui à déjà pris sa forme définitive, mais de parfaire la régularité de sa surface en réalisant une sorte de lustrage. On peut employer des outils en bois, en métal recouvert de feutre, ou en feutre aggloméré, mais ils sont le plus souvent en liège naturel ou aggloméré. Ils agissent en frottant sur le verre les grains minuscules de potée ou d'oxyde de cérium dont on les saupoudre.

Pour des bons Caractéristiques des meules diamantées pour le verre, Considérant d'abord les meules à liant métallique.

Les principaux paramètres sur lesquels il est possible de jouer pour concevoir un outil sont : son diamètre, la largeur de la couronne diamantée, le type de couronne diamantée (continue, segmentée avec des segments ouverts, segmentée avec des segments fermés), la constitution de liant, la grosseur des grains de diamant, la concentration du diamant, la vitesse de rotation de l'outil.

Pour définir ces différents paramètres il va falloir prendre en compte le type e façonnage réalisé principalement par la machine.

- Rôle de l'outil de biseautage :
 - Présente l'élément important du procédé de biseautage ;
 - Assure l'usinage du verre ;
 - Garanti une bonne qualité de biseautage de verre.

IV.3.4 Table avec système glissant

On a réalisé un trou pour permettre à l'outil de tourné avec facilité, aussi des rainures (deux ouverture), Lelong de la table fixe pour permettre le glissement du panneau, genre d'une glissière pour assurer le mouvement horizontal du panneau coulissant sur la table fixe (**Fig. IV.8**).

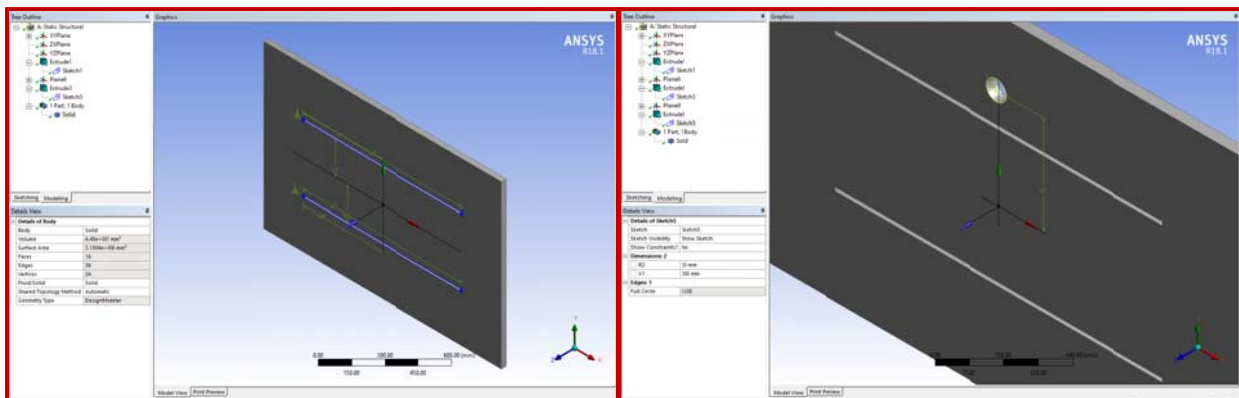


Fig. IV.8 : (a)Réalisation de deux rainures,(b) Perçage d'un trou.

- Rôle du système glissant et trou :
 - Système glissant sert à faciliter le mouvement du chariot mobile sur la table fixe.
 - Garanti la platitude et le niveau stable du verre a usiné.

Remarque :

Le trou présente une réservation pour l'outil de biseautage.

IV.3.5 Chariot glissant

Le système de glissement consiste à faire glisser un panneau sur une table fixe par l'intermédiaire d'une glissière (montage male femelle), qui va faire faciliter le mouvement dans l'horizontale du plateau sur la table fixe (**Fig. IV.9**).

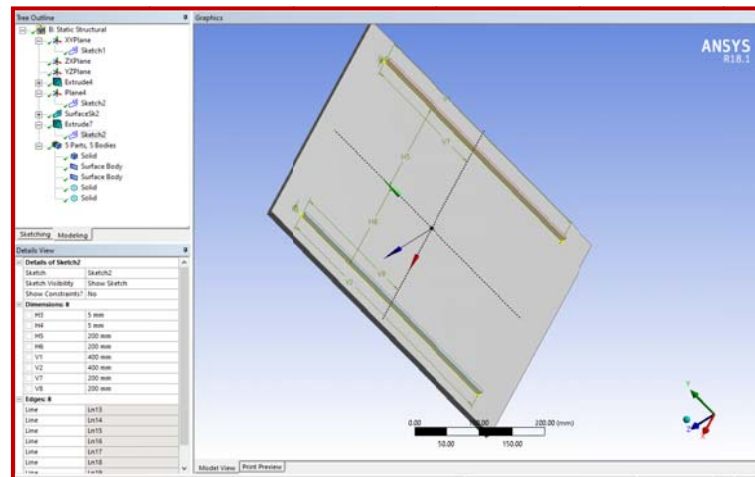


Fig. IV.9 : Chariot glissant avec glissière.

Ce panneau glissant sera actionné par un petit moteur et un système d'engrenage qui fait le mouvement horizontal et assure l'opération de biseautage du verre (**Fig. IV.10**).

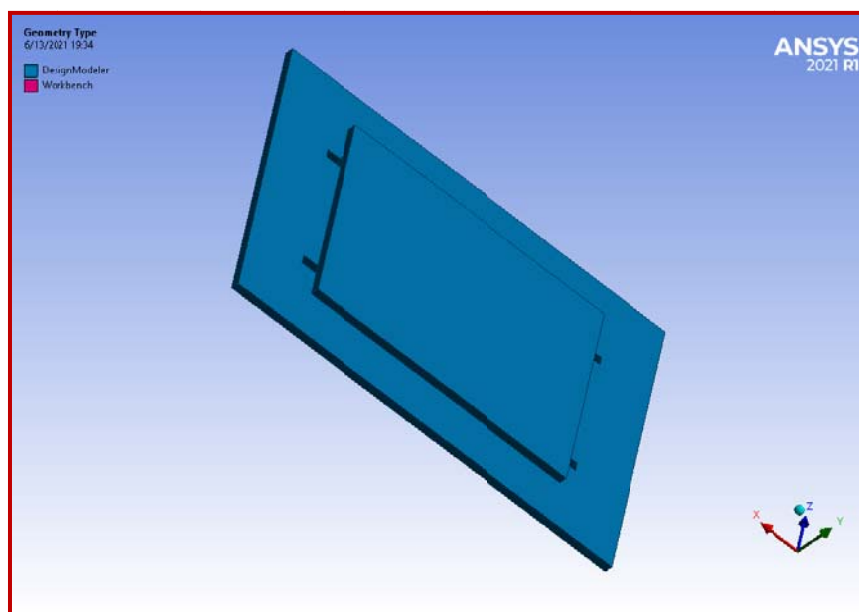


Fig. IV.10 : Montage d'un chariot glissant sur la table.

- Rôle du chariot glissant :
 - Assure le mouvement du verre à usiner.
 - Garanti un déplacement réversible du verre.

Pour faire glisser le panneau, on a choisi le système pignon-crémaillère qui va transformer le mouvement de rotation en translation (**Fig. IV.11**).

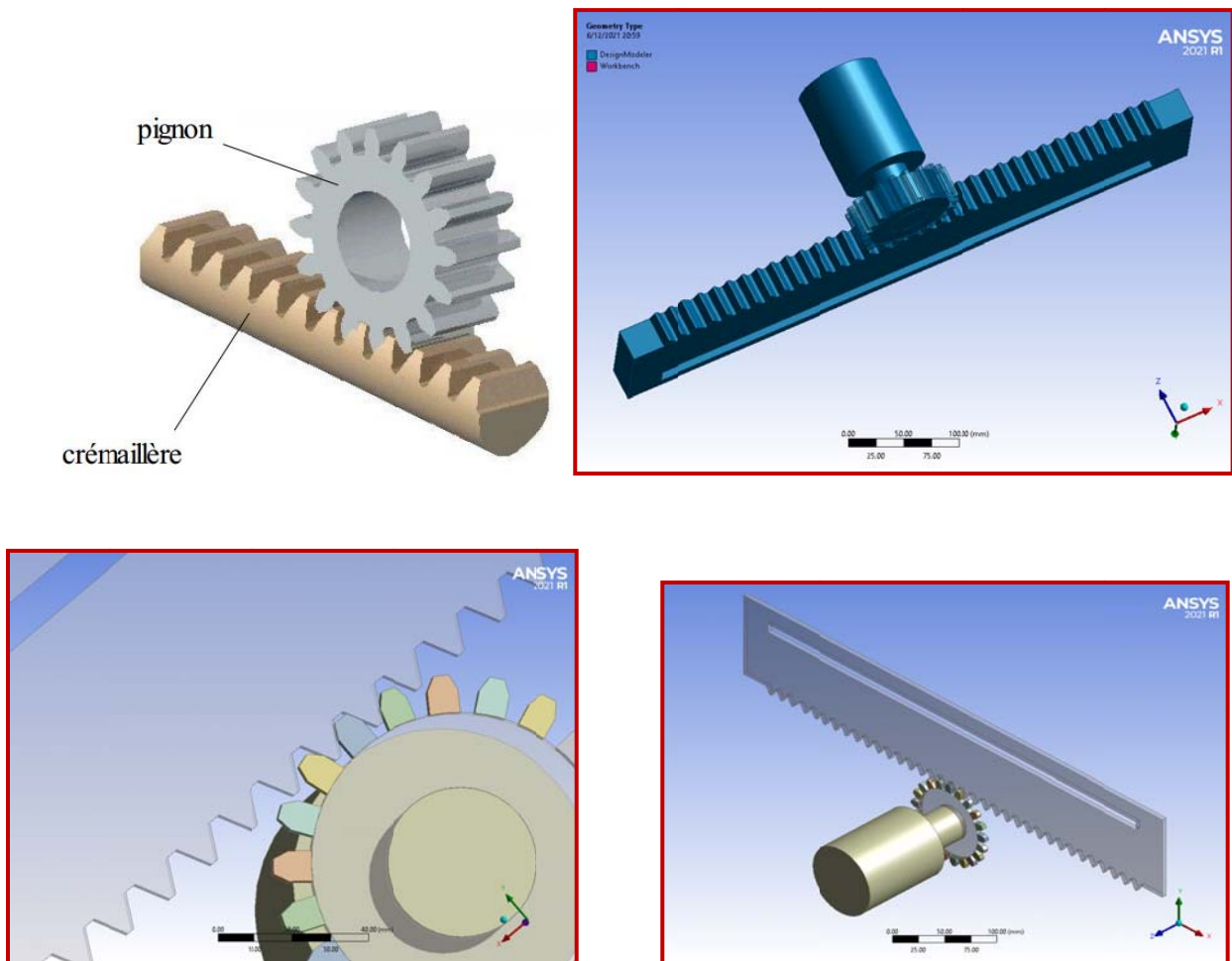


Fig. IV.11 : Système pignon-crémaillère.

- Rôle du système pignon-crémaillère :
 - Assure le mouvement du chariot mobile.
 - Transforme le mouvement de rotation moteur en translation.
 - Garanti un déplacement réversible du chariot.

Le système pignon-crémaillère est un système réversible, Ce principe est utilisé pour faire pousser le panneau dans l'horizontale par un petit moteur qui fait tourner cet engrenage (**Fig. IV.12**).

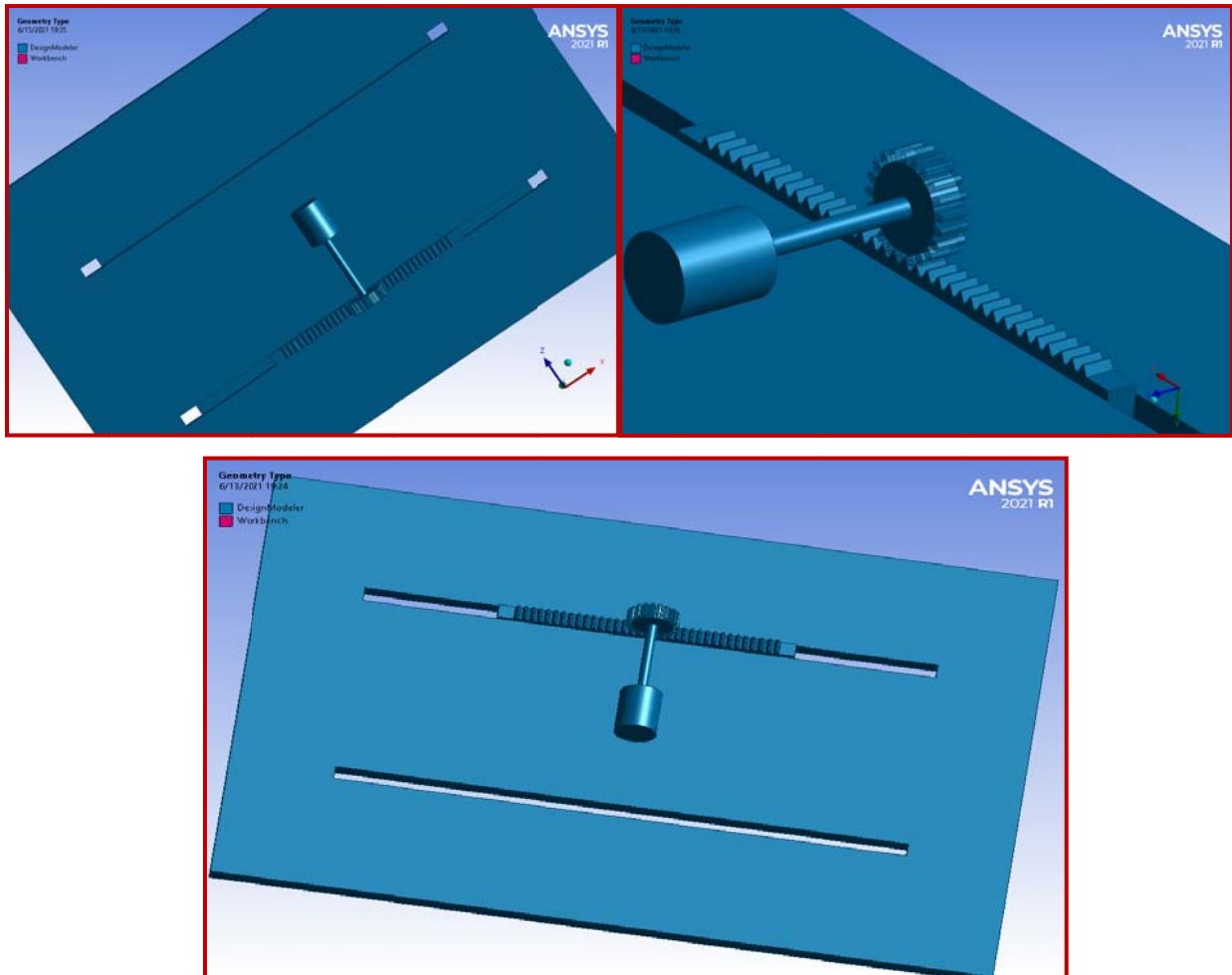


Fig. IV.12 : Vue d'ensemble chariot-moteur-engrenages.

Sur ce panneau glissant on pose le verre qui va être biseauté. Ou il va être fixé par des pinces-croché, et on fait glisser le panneau dans l'horizontale (**Fig. IV.13**).

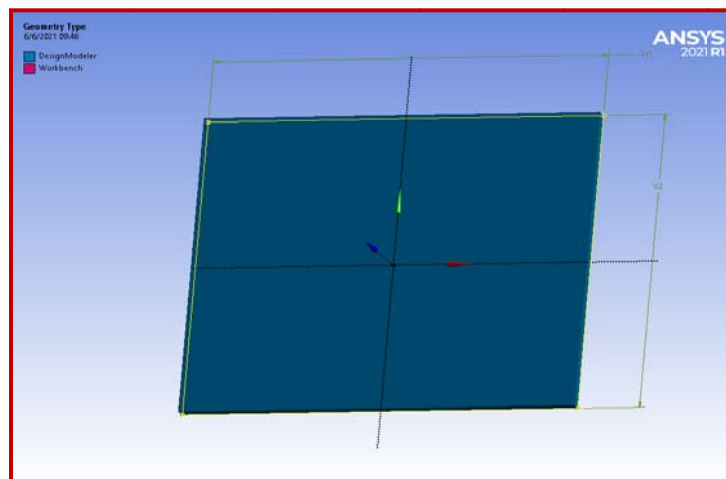


Fig. IV.13 : Verre posé sur le chariot.

IV.3.6 Couvercle de protection

On a monté un couvercle qui protège l'opérateur des bavures de verres coupés par l'outil lors du mouvement de rotation, et même l'eau de refroidissement va être rassemblé et orienté vers le bac d'eau (Fig. IV.14).

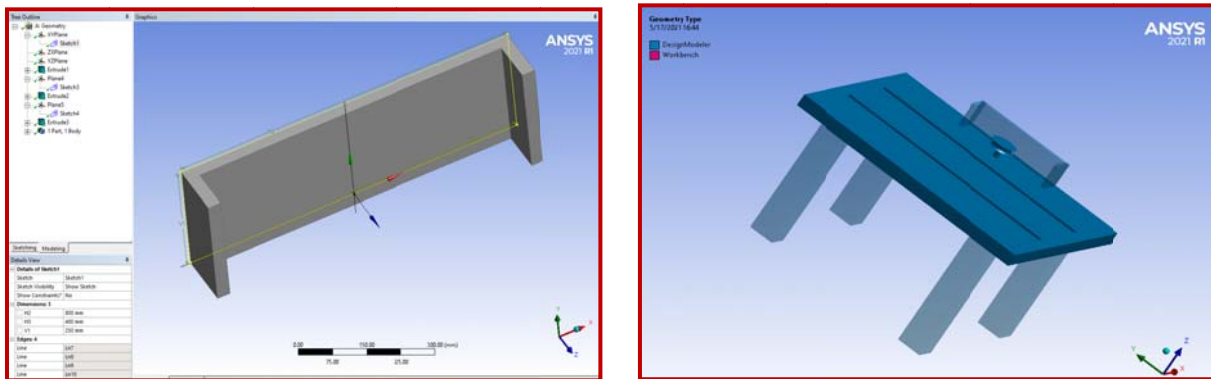


Fig. IV.14 : (a) couvercle, (b) Montage d'un couvercle de protection.

- Rôle du couvercle :
 - Assure une sécurité à l'opérateur.
 - Protège l'environnement des résidus de verre (bavure).
 - Présente un obstacle à l'eau de refroidissement pour que l'eau reste dans le bac

IV.3.7 Guide cylindrique de glissement

Pour assurer la platitude et la régularité du verre, on fait le montage des guides cylindrique qui facilite le mouvement du verre posé sur le plateau (Fig. IV.15).

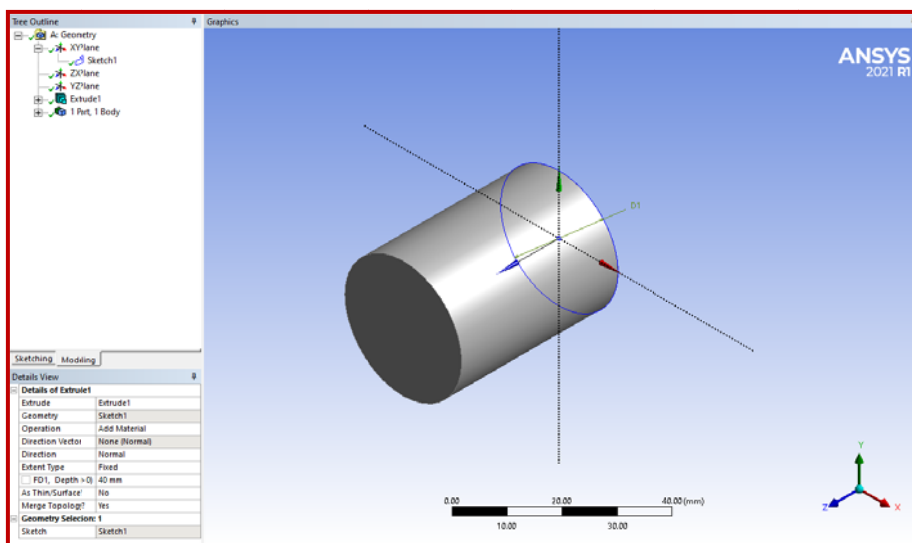


Fig. IV.15 : Montage des guides cylindriques.

- Rôle des guides cylindriques :
 - Assure le glissement facile du verre.
 - Garanti la platitude et le mouvement horizontal du verre.

IV.3.8 Système de refroidissement

Le système de lubrification (refroidissement) est très essentiel et très sensible au même temps, ou il est constitué d'un bac d'eau, ou elle va rassembler tous les coupants et résidus due au biseautage réaliser par l'outil, ce mécanisme est composé de bac (réservoir), tuyau, robinet d'écoulement d'eau et deux pompes (Fig. IV.16).

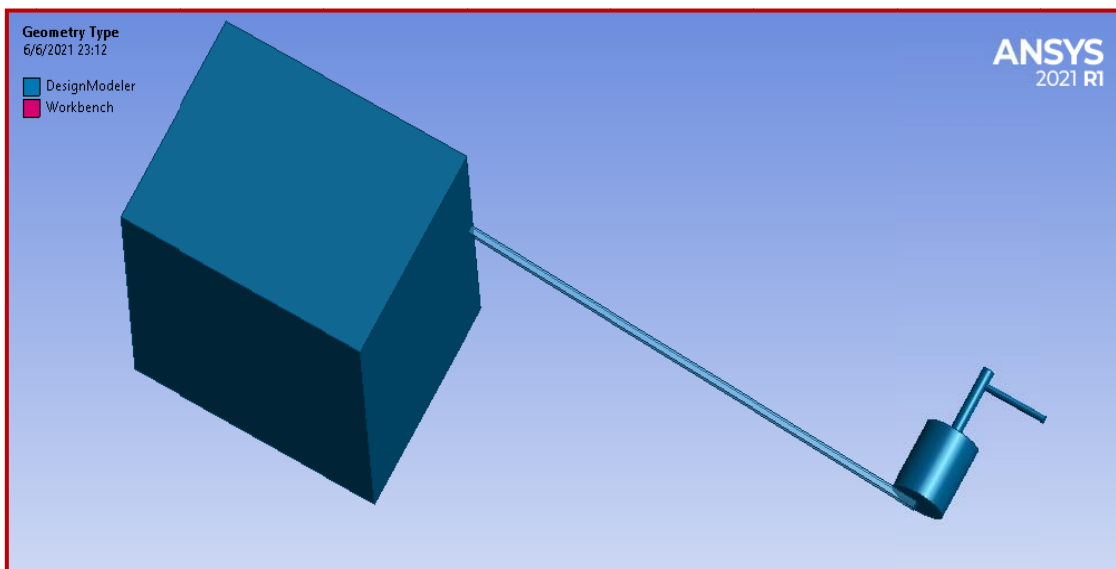


Fig. IV.16 : Système refroidissement (bac, tuyaux et pompe).

- Rôle du système de refroidissement :
 - Assure la lubrification de l'outil de biseautage.
 - Garanti le refroidissement du matériau verre a usiné.

IV.3.9 Système alimentation électrique et boîte de commande.

L'usinage de verre dans notre cas est assuré par une boîte de commande qui donne à l'opérateur la possibilité de manipuler tous le système facilement (Fig. IV.17).

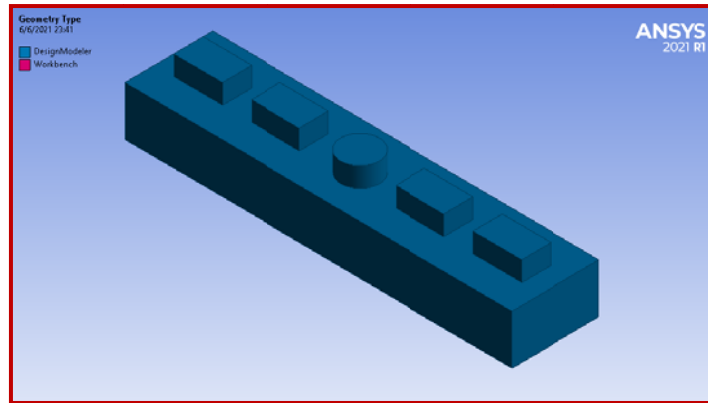


Fig. IV.17 : Tableau des commandes.

- Rôle du tableau des commandes :
 - Facilite a l'opérateur de manipulé la machine de biseautage.
 - Assure un système automatique à la machine.
 - Garanti un biseautage simple sans effort manuelle.
 - donne la commande au moteur rotatif.
 - avance du chariot automatique avec une vitesse déterminé.
 - lubrification du système de biseautage.

Dans cette machine on a monté les câbles électriques sous la table, lié avec tous le système (moteur1, moteur2, pompe refroidissement et panneau glissant) (**Fig. IV.18**).

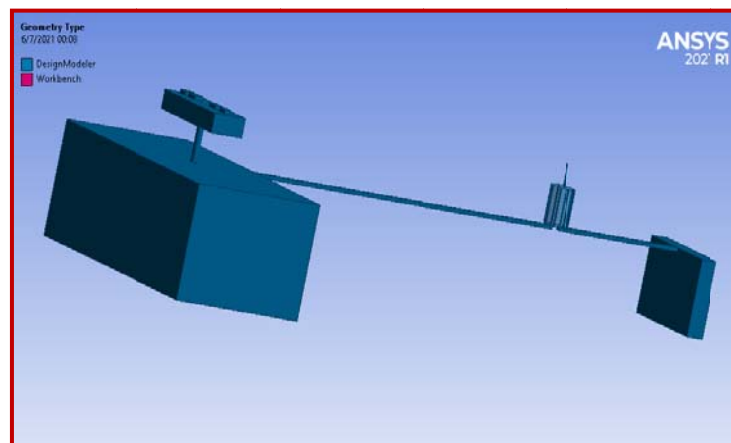


Fig. IV.18 : Système alimentation électrique.

- Rôle du système alimentation électrique :
 - Assure le courant qui alimente le moteur 1 de l'outil de biseautage.
 - Assure aussi le courant au moteur 2 qui fait déplacer le chariot mobile.
 - Garantir la lubrification par l'alimentation de la pompe de refroidissement.

On ce qui concerne le dimensionnement, le mode opératoire de la réalisation de la machine (voir [Tableau IV.1](#))

N°	Désignation	nuance	Dimension	Opération réalisé	Montage et fixation
1	Support	Acier ordinaire	100x100	Coupe du fer rectangle de 1metre	Fixation des supports par terre par boulon
2	Table	Acier ordinaire	2000X1200	Coupe du fer rectangle Coupe tôle 3mm Soudage de la tôle avec le cadre Réservation pour glissière	Table soudé avec les quatre pieds (supports) Montage de la glissière par rivet
3	Glissière	Aluminium	40x40	Rainure male femelle dans le cadre 40x40	Montage des glissières dans la table et le panneau glissant
4	Panneau glissant	Matériau composite	1000x1000	Coupe du panneau en 1x1 mètre	Montage glissière dans le panneau glissant par rivet
5	Couvercle de protection	Aluminium	800x300	Coupe tôle en Al	Montage sur la table par soudure
6	Guide glissière	Matériau composite	80x50	Guide cylindrique disponible au marché	Montage sur la table par boulon
7	Support auxiliaire	Acier ordinaire	500x300	Coupe des supports fer I	Montage du support avec la table par boulon
8	Moteur électrique	Acier ordinaire Cuivre	220V	Moteur disponible au marché	Fixation du moteur sur le support auxiliaire
9	Outil de biseautage	Diamant	Ø = 100	Outil disponible au marché	Assemblage de l'outil avec l'axe de rotation par clavette
10	Axe d'assemblage	Acier ordinaire	Ø = 30 L=200	Axe réalisé par tournage et rainure de clavette40x8	Assemblage de l'axe avec moteur rotatif par clavette
11	clavette	Acier ordinaire	40x8	Confectionner par tournage	Assure la fixation axe avec outil biseautage

Tableau IV.2: Dimentionnements, caractérisations et différnts étapes de réalisation de la machine

biseautage.

IV.4 Etapes de réalisation de la machine de biseautage bords verre

Pour la réalisation de cette machine de biseautage, on propose une table rectangulaire de 2 mètre de longueur et 1,20 mètre de largeur (**Fig. IV.19**); fabriquer suivant les étapes suivantes :

- a) Soudage d'un cadre de fer rectangulaire 100x50 ;
- b) Soudage d'une tôle de 3mm sur le cadre ;

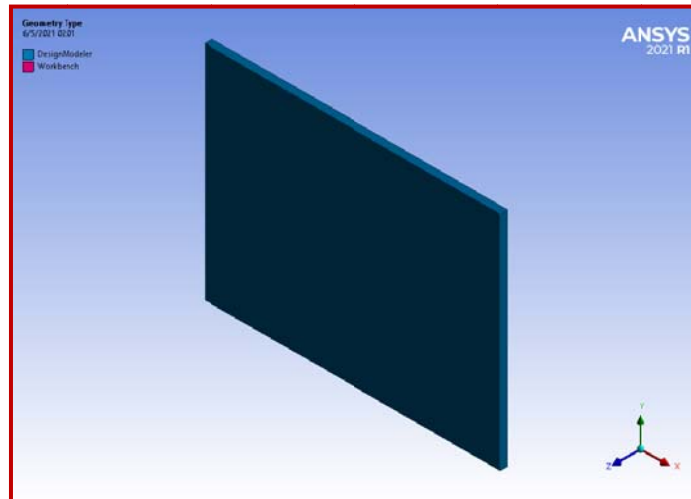


Fig. IV.19 : Réalisation de la table fixe.

Puis on fait l'opération de perçage des trous :

- c) trous pour l'outil de biseautage de 70 mm de diamètre (sortie de l'outil) ;
- d) trous de fixation des pieds de la table (supports)
- e) Réalisation des rainures dans la table de longueur de 1,50 mètre (**Fig. IV.20**)

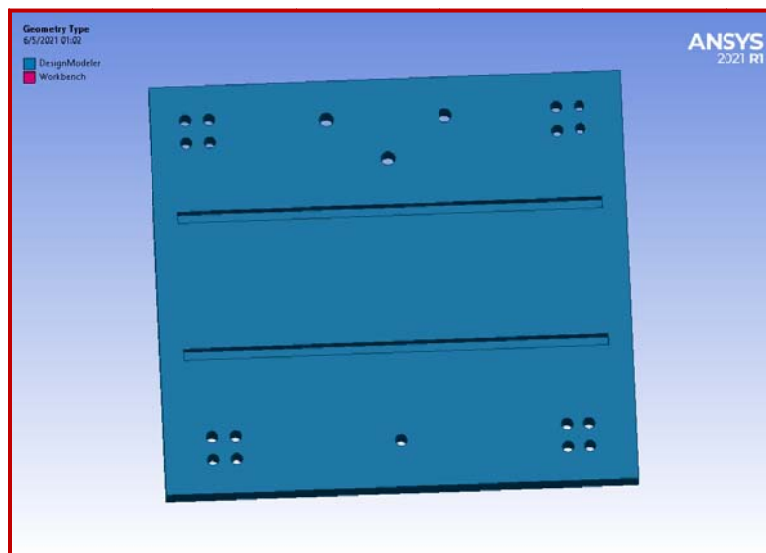


Fig. IV.20 : Table après usinage.

f) Montage des supports (150x100) sur la table déjà réalisé (**Fig. IV.21**)

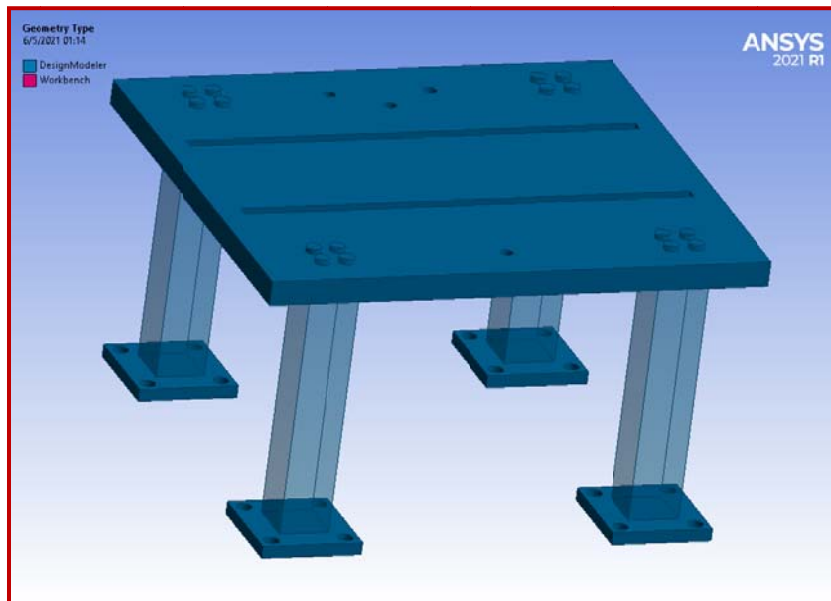


Fig. IV.21 : fixation des supports.

On assure ce montage (**Fig. IV.22**) par boulon sur les normes de fabrications indiqué dans le tableau IV.1 :

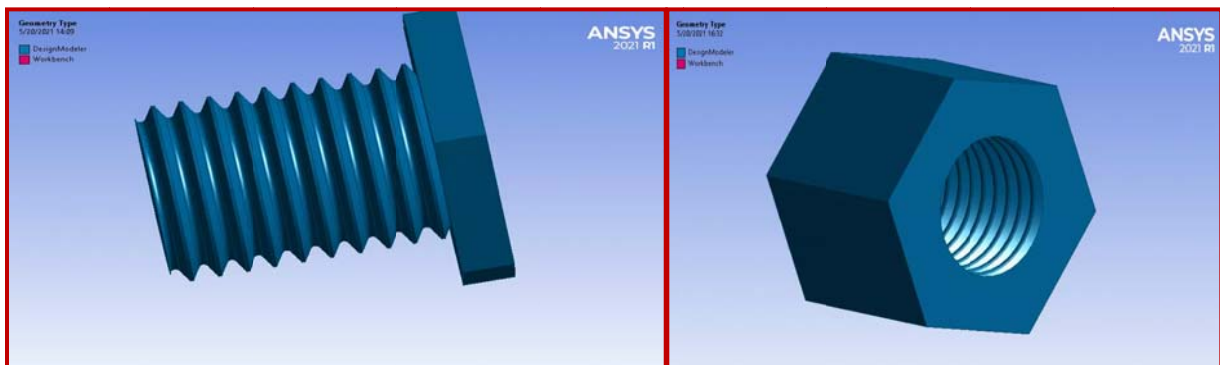


Fig. IV.22 : Boulon de fixation.

- g) Montage du moteur sur un support mobile dans la verticale qui assure le montage-démontage de l'outil, aussi pour l'usinage de différentes épaisseurs de verre (**Fig. IV.23**).

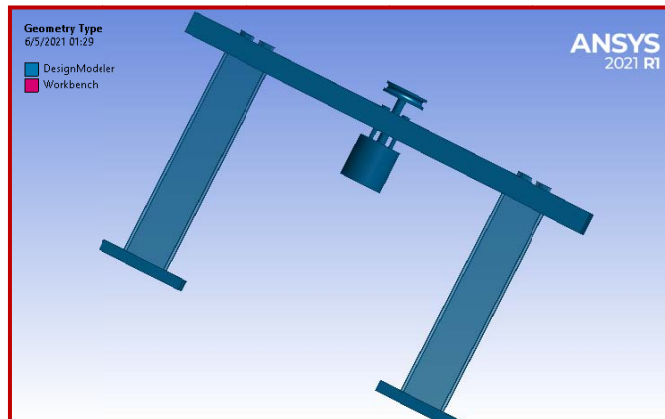


Fig. IV.23 : Fixation de l'outil et moteur électrique.

- h) Montage du moteur électrique avec l'outil de biseautage par système clavette (**Fig. IV.24**).

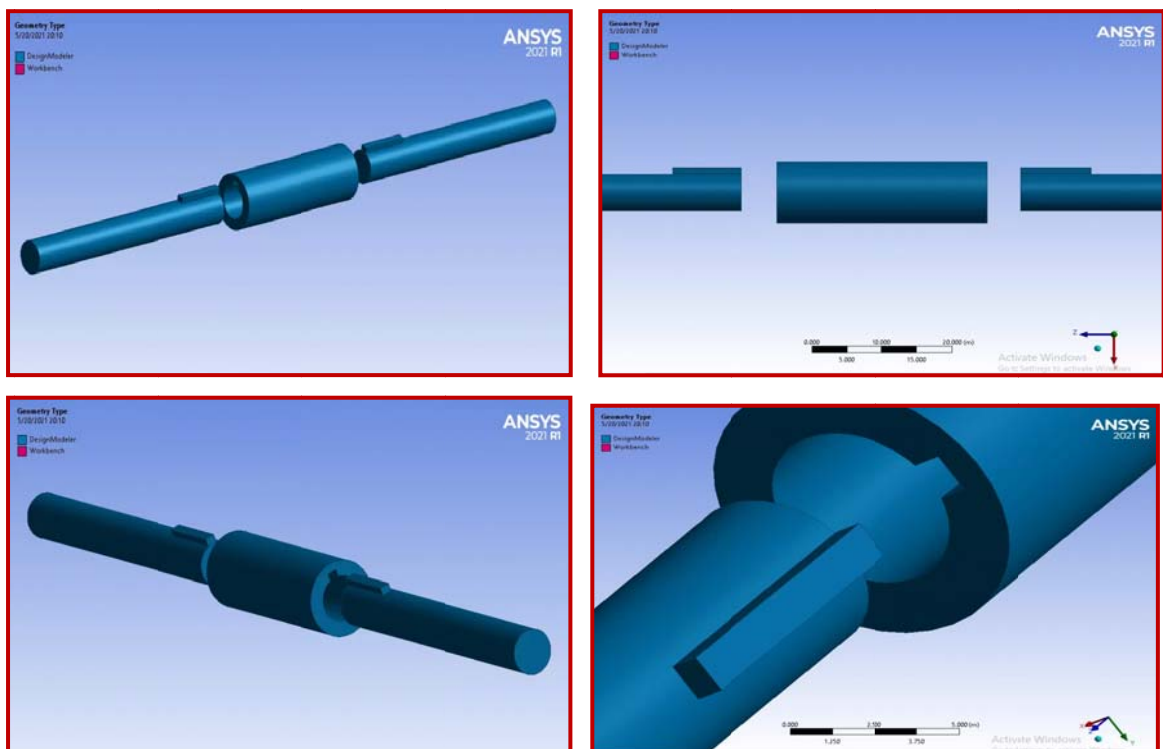


Fig. IV.24 : Système de fixation d'outil avec le moteur électrique.

- i) Montage d'un système de refroidissement qui assure la lubrification de l'outil et fait refroidir tous les organes de la machine, aussi que le matériau verre (**Fig. IV.25**).

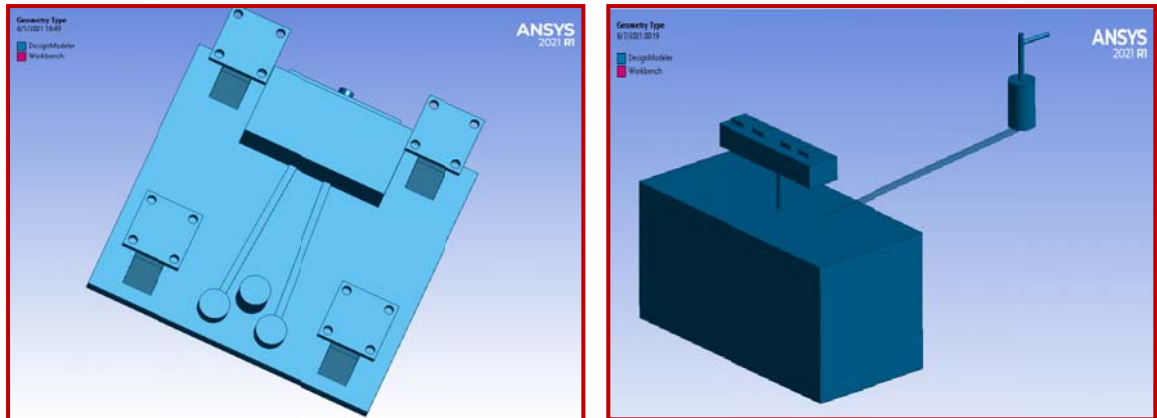


Fig. IV.25 : Système de lubrification.

- j) Fixation des cylindres rotatifs pour assurer la platitude et l'uniformité de l'usinage du verre, aussi le glissement facile du verre.
- k) Montage d'un chariot mobile sur des glissières (montage male-femelle), pour permettre le mouvement du chariot sur la table par l'intermédiaire d'un montage pignon-crémaillère alimenter par un petit moteur électrique, ce montage va transformer le mouvement du rotation en translation (Fig. IV.27).

Cette transformation fait partie de la famille des engrenages, ou La vitesse de translation de la crémaillère est fonction du diamètre de la roue dentée (Fig. IV.26).

$$(V=r.w)$$

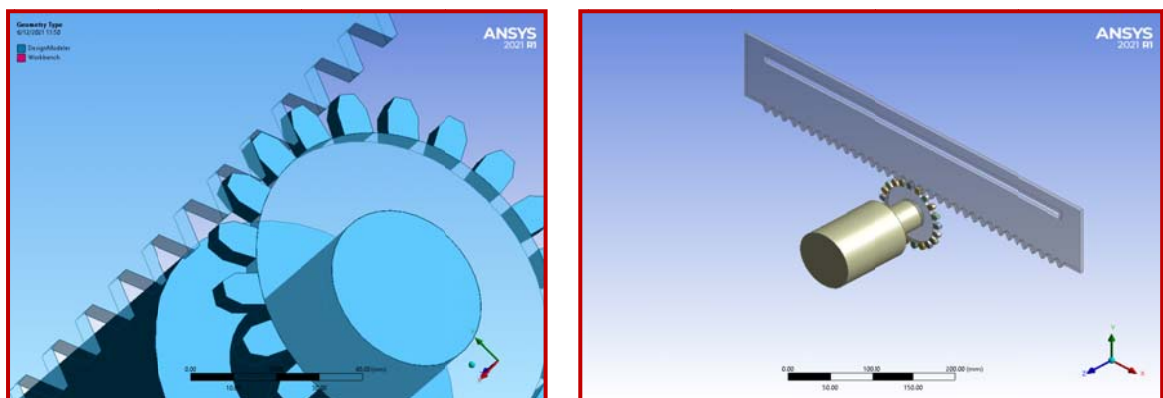


Fig. IV.26 : Système pignon-crémaillère.

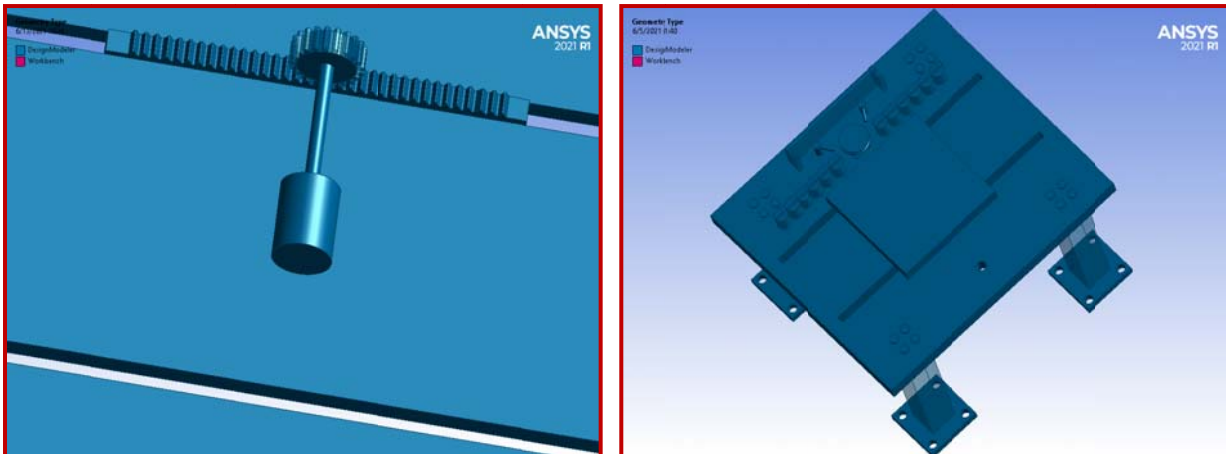


Fig. IV.27 : Chariot glissant.

- l) Sous la table on va réaliser un tiroir mobile (bac d'eau) qui va rassembler les coupeau de verre, aussi l'eau de refroidissement dans un circuit fermé (Fig. IV.28).
- m) Montage de deux pompes à eau qui assure le refroidissement permanents des organes et verre.
- n) Montage d'une boîte de commande qui facilite a l'opérateur le commandement de la machine.

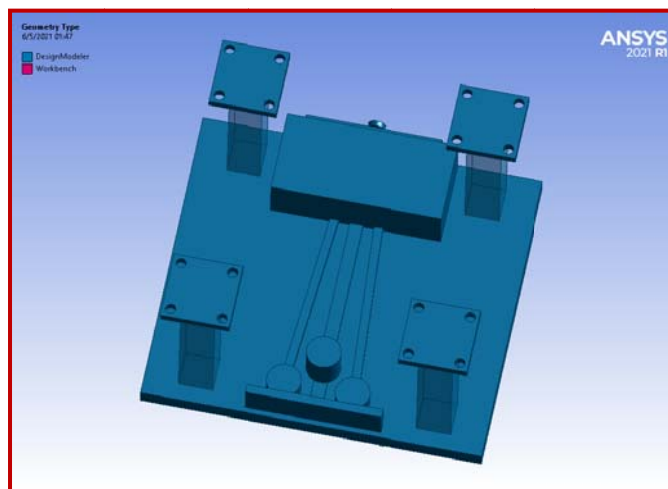


Fig. IV.28 : Fixation de la pompe, la boîte de commande et système électrique.

IV.5 Dessin d'ensemble

L'appareil de biseautage est une machine simple, pratique et économique, elle peut être réalisé facilement grâce aux matériaux disponibles utilisés, pour cette réalisation il faut qu'on respecte la platitude de la table et le panneau glissant (même niveau) et la verticalité de l'outil

(Fig. IV.29)

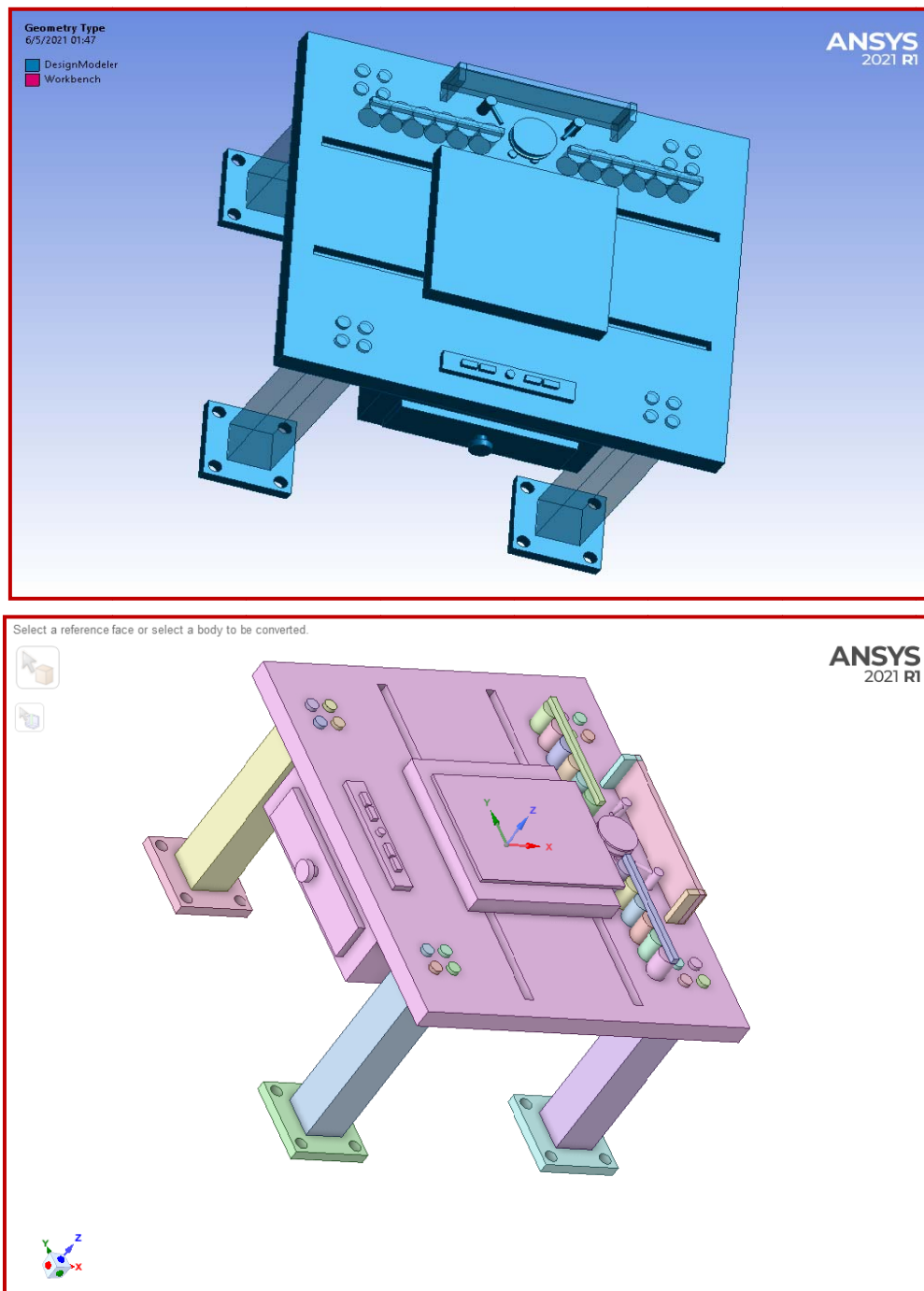


Fig. IV.29 : Désigne de la machine de biseautage.

IV.6 Simulation de l'opération de biseautage

L'outil de biseautage est en matériau spécial abrasif (diamant ou tanguestin), qui tourne d'une vitesse constante et lors qu'il tourne on fait glisser le verre qui va être biseauté dans l'horizontale avec une vitesse moyenne bien étudié, et lors se contacte on remarque l'enlèvement des copeaux de verre avec une déformation, échauffement du matériau, ou on a fait une simulation de l'opération biseautage.

- **Géométrie**

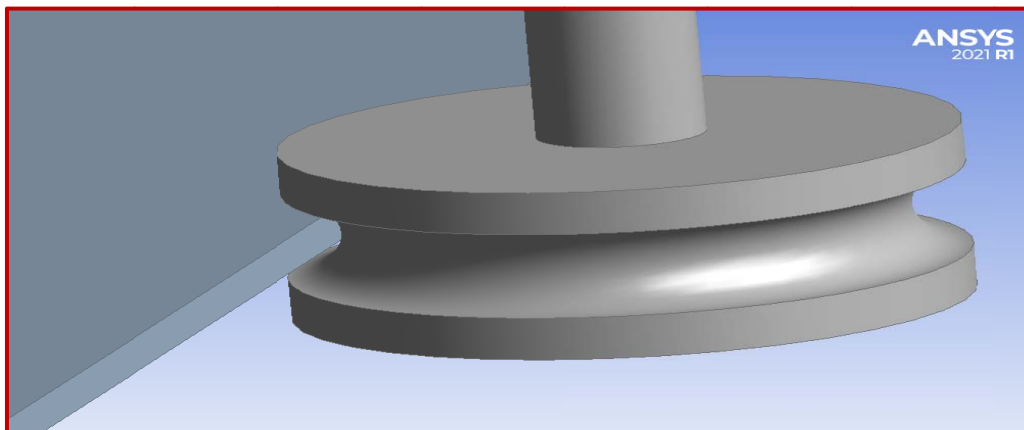


Fig. IV.30 : Géométrie de l'outil de biseautage et la plaque du verre biseauté.

- **Choix des matériaux**

Le **Tableau IV.3** montre les propriétés mécaniques de l'outil et plaque verre.

	E (MPa) Module de Young	P (Kg/m3) Densité à (18°C)	ν Coefficient de Poisson
Outil de biseautage	920×10^3	3860	0.29
Verre	73000	2500	0.2

Tableau IV.3: Les propriétés mécaniques d'outil et plaque de verre.

- **Maillage**

L'outil et la plaque de verre sont maillés à $1 \text{ e-}3 \text{ m}$, pour chaque élément (**Fig. IV.31**).

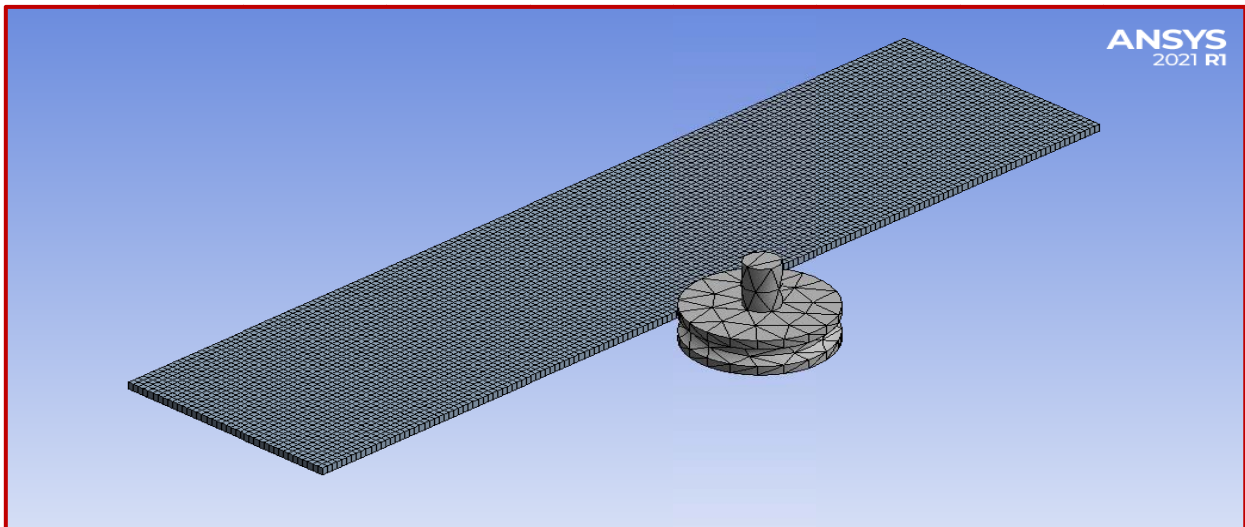


Fig. IV.31 : Maillage de l'outil de biseautage et la plaque du verre biseauté.

- **Conditions aux limites**

L'outil est fixé sur les trois translations (UX, UY et UZ) et les deux rotations (RX, RY)

(**Fig. IV.32**)

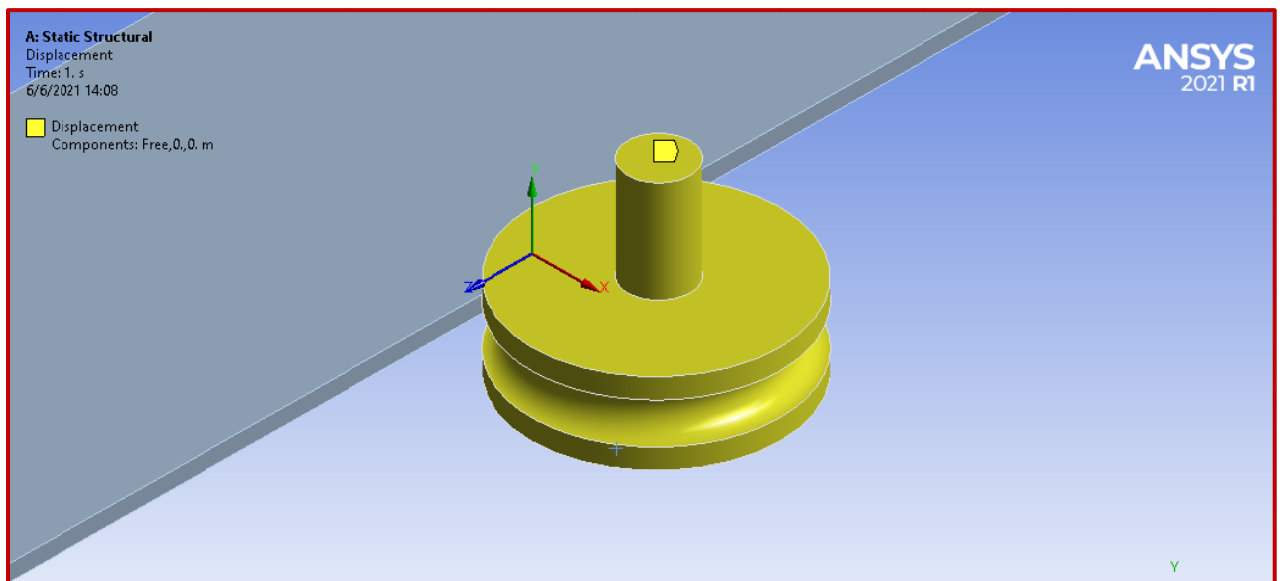


Fig. IV.32 : Comportement de l'outil lors de l'opération biseautage.

- **Application des charges**

On applique dans notre modèle :

- Rotation de 300 Rd/s sur l'outil (**Fig. IV.33**)
- Une force de 10 N sur la plaque du verre (**Fig. IV.34**)

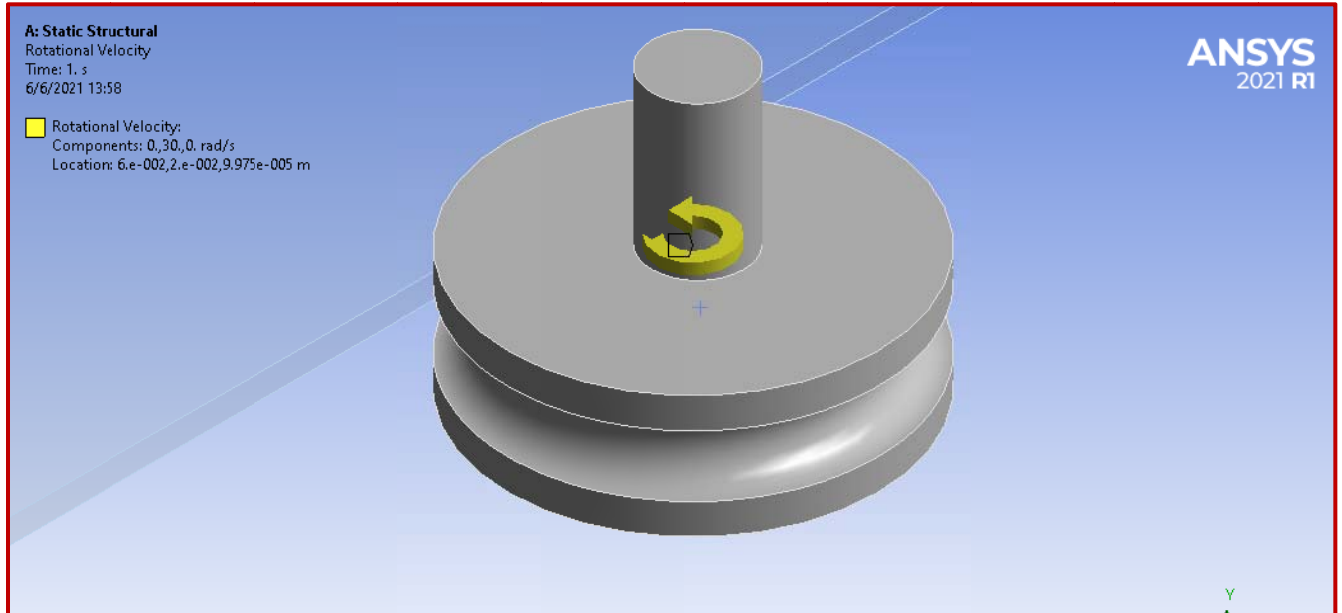


Fig. IV.33 : Application d'une rotation de 300 tr/min sur l'outil de biseautage.

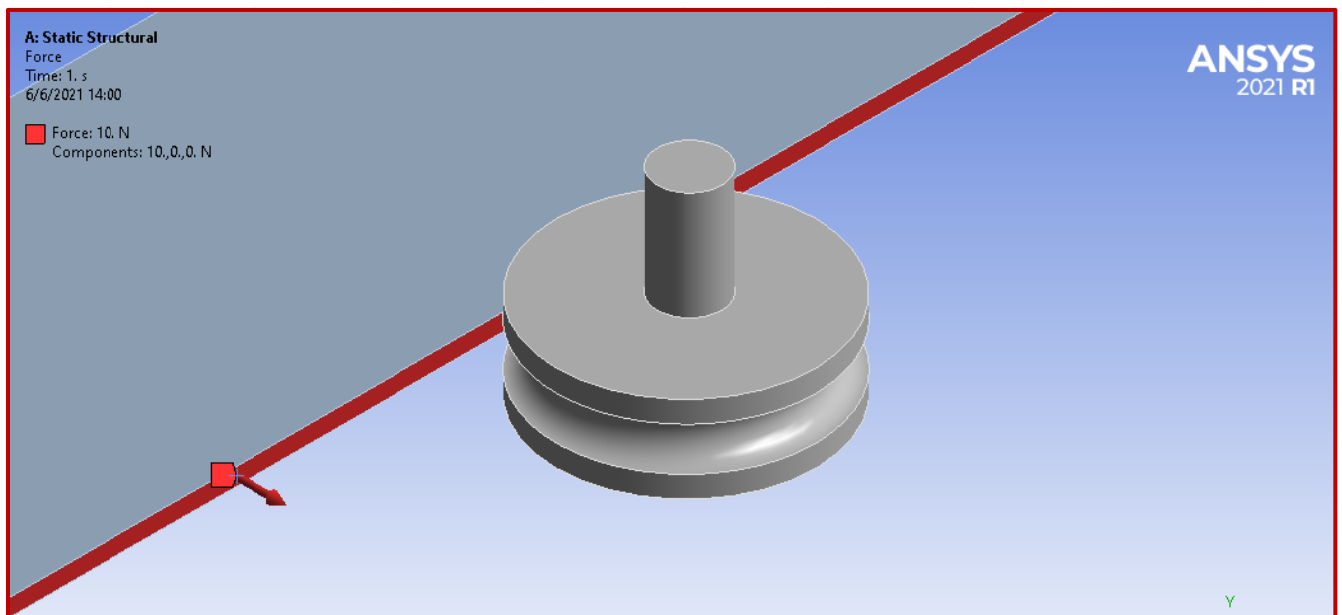


Fig. IV.34 : Application de la force 10N sur la plaque du verre.

- **Zone de contact**

La figure (Fig. IV.35) montre la zone de contact et frottement entre l'outil et la plaque de verre

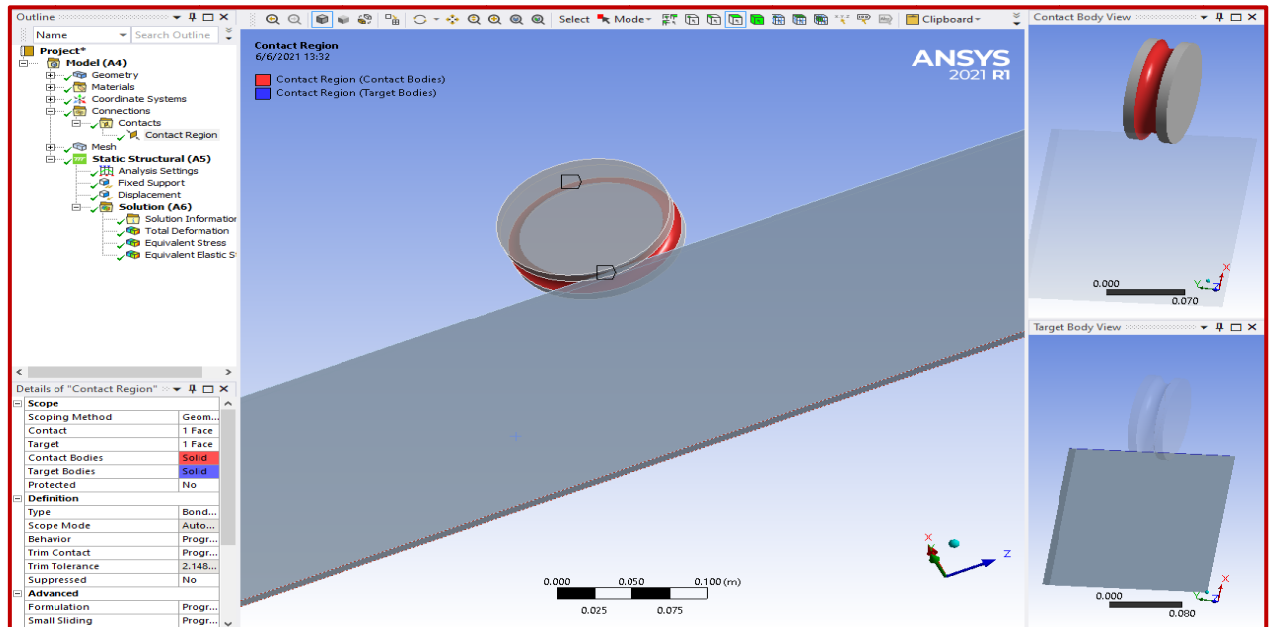


Fig. IV.35 : La zone de contact et frottement.

- **Résultats**

La figure (Fig. IV.36) présente les contraintes et les déformations dans la plaque du verre au cours de biseautage.

Logiquement la partie d'augmentation des contraintes et déformations est la zone de contact, cette zone présente la zone d'usure.

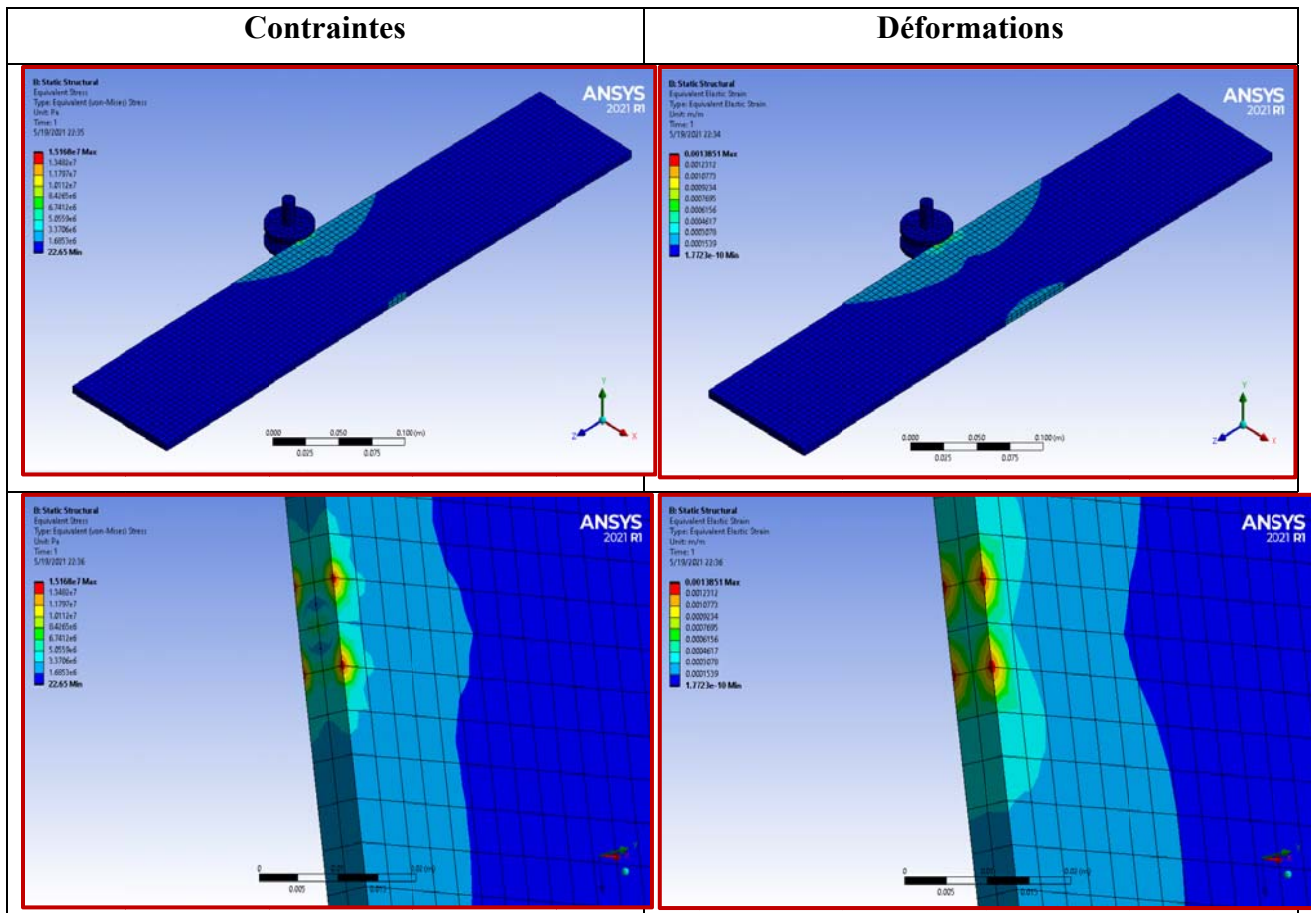


Fig. IV.36 : Contraintes et déformations résultantes au cours de l'opération de biseautage.

IV.7 Conclusion

Comme il est important de réaliser un produit bien fini et donne plus de sécurité aux consommateurs, les bords finis donnent un aspect décoré au produit réaliser (étagère, fenêtre, porte glissant, ou façades des bâtiments ou immeubles).

Dans ce chapitre on a fait une étude, conception et dimensionnement d'une machine de biseautage bords de verre avec différents composants de la machine ainsi les étapes de la réalisation et montages de ce dispositif.

Dans la fin de ce chapitre on a fait une simulation de l'opération de biseautage, et le comportement du verre et l'outil de biseautage, ou on a retiré des résultats sur les contraintes et les déformations lors de l'opération effectués.

Conclusion Générale



Conclusion Générale

Ce procédé d'usinage de verre nous a permis de mettre en valeur le matériau verre qui peut évoluer l'économie du pays, et participe au développement des nations aussi il répond à l'exigence des consommateurs dans le côté esthétique et décoratif.

Le verre est devenu un matériau qui peut satisfaire des exigences de sécurité, décoratif, protège contre d'incendie et même pour l'énergie solaire.

dans le secteur automobile ou le biseautage s'applique à la fabrication de miroirs rétroviseurs, vitres pare-brise.

L'utilisation du verre dans la construction est devenue un concept architectural que ce soit en architecture intérieur ou en construction de façades et de toits.

Chaque type de vitrage à une destination bien spéciale selon le désir du constructeur et l'exigence du consommateur.

Le système de biseautage dans notre marché algérien consiste à réaliser des portes coulissantes bien fini respecte les normes de fabrication (ouvertures et fermeture), tables, fenêtres, étagère.

Dans le domaine bâtiment l'exigence de la perméabilité de la chaleur ainsi que la lumière du soleil vers l'intérieur des immeubles, nous oblige aujourd'hui de disposer d'une vaste gamme de vitrage bien façonné.

Dans le secteur automobile le biseautage a une énorme importance ou il s'applique à la fabrication des miroirs rétroviseurs, vitres et pare-brise.

Dans le domaine des énergies renouvelables, avec ce procédé on réalise des panneaux solaires dans des dimensions bien déterminés et bien fini dans leurs bords assurant une protection au montage et démontage de ses Panneaux.

Dans ce travail on a proposé un nouveau système de biseautage simple, automatique et n'est pas couteux qui répond aux exigences du marché algérien, dans la réalisation des portes, étagères, vitrines, fenêtres et tables, et pourquoi pas dans autres domaines de bâtiments ou automobiles.

Références

bibliographiques



Références bibliographiques

- [1] Hdouri A bdelmoumen : « Cours de caractérisations des matériaux » Technologue à l'ISSET Gafsa.
- [2] Dr. Aattache Amel. Thèse « Nouveau matériau : Le verre dans le bâtiment » U.S.T.O 2017-2018.
- [3] Baltus. C et Hauglustaine. J.M, « types de vitrages, réinventons l'énergie » LEMA, Département d'Architecture et d'Urbanisme, Université de Liège, Belgique, février 2003.
- [4] Pageon. G »l'élaboration du verre » une petite encyclopédie du verre, vol 13 N° 5, p 14-17, octobre 2007.
- [5] Picard. F « le verre et ses propriétés » présentation : <http://slideplayer.fr/slide/10158430/>
- [6] : Barton. J et Guillemet. C, « Le verre science et technologie » EDP Sciences, France, 2005.
- [7] : Le Bourhis .E « Le float: une invention révolutionnaire » Institut P'Poitiers. Journée 70 ans de SF2M et de Matériaux, Paris, 20 mars 2015.
- [8] : Livret technique, « Le verre » Document ressource Technologie, ALU-VERRE-PVC.
- [9] Riouf Flat Glass « le verre pensé pour vous » Société sous certifications ISO 9001, ISO 14001 et OHSAS 18001 dans l'usine Eurofloat de Salaise-sur-Sanne, Isère, France,
- [10] : D. Adams, Cobelver SA et al, « Le verre et les produits verriers – les fonctions des vitrages » Note d'information technique 214, centre scientifique et technique de la construction, Bruxelles, Belgique, Décembre 1999.
- [11] ENSCI « Les matériaux ». Université de limoges.
- [12] : <http://www.archiexpo.fr/prod/glashuette-lamberts-waldsassen/product-62657-926360.html>
- [13] : Les verres profilés : <http://www.miroiteriegbm.com/Les-verres-profiles>
- [14] : Verre trempé/ <http://www.origer.lu/index.php/fr/types-de-verre-verre-trempe-desecurite-feuille-feuille-trempe>
- [15] : Plakglass : <https://www.plakglass.fr/epaisseur-du-verre.php>
- [16] Glaströsch. « Verre et ses applications pour des constructions judicieuses et une utilisation compétente du verre ».
- [17] ALU – VERRE - PVC Technologie « Façonnage ».
- [18] IMPACT Luxemburg « Le verre » fondation du grand-duc et la grande-duchesse.
- [19] <http://WWW.docs-avms.co> (Docs#Aluminium#Verre) theme ColorMag Par theme Grill).
- [20] Diamut. « Glass Tooling. Outils pour le façonnage du verre » Juillet 2019.
- [21] NORTON Abrasifs agglomères « information technique ».
- [22] Artema « avantages et employés des différents transmissions mécaniques ».