

Stage de travail sur le verre

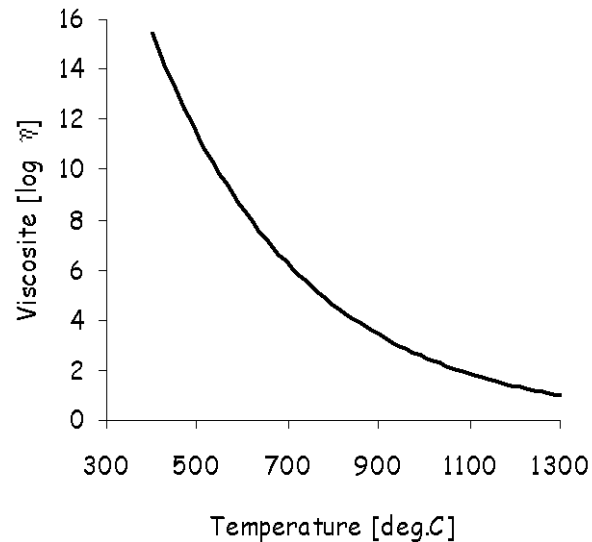
Aide mémoire a l'usage des stagiaires laborants en physique

- ♦ Structure
- ♦ Composition
- ♦ Propriétés mécanique
- ♦ Elaboration
- ♦ Propriétés optique
- ♦ Assemblages verre - métal

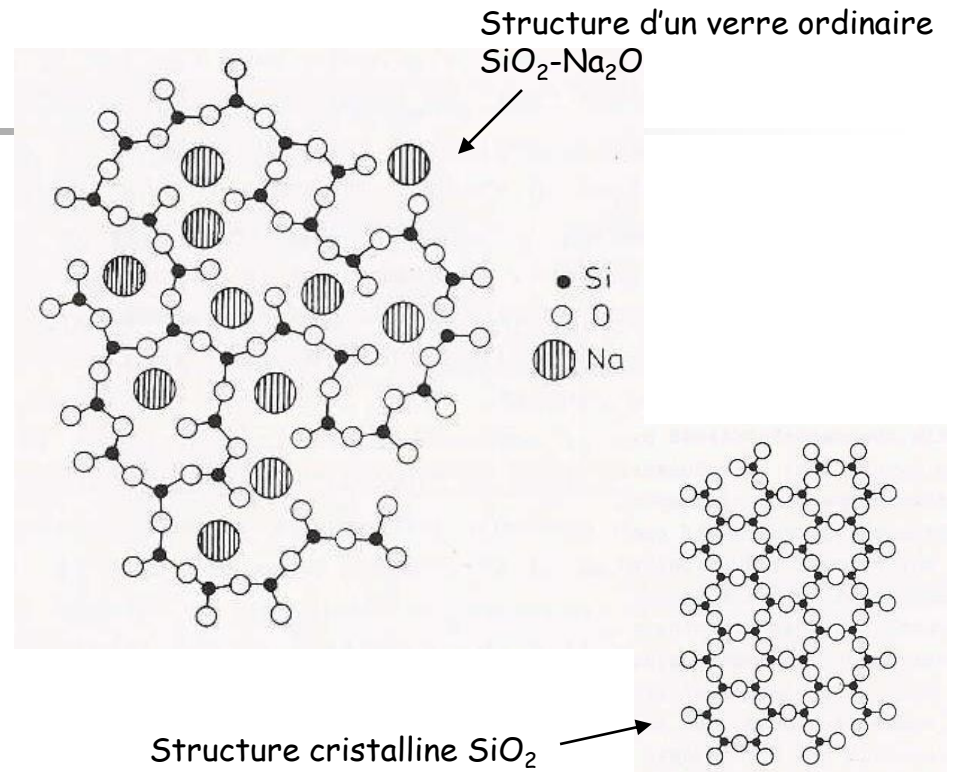


Structure

- Solide amorphe (non cristallin) composé essentiellement silice (SiO_2).



Courbe de viscosité en fonction de la température pour un verre ordinaire



- Matériau dur, fragile (cassant) et transparent.
- Peut être considéré comme un liquide super refroidi.
- Pas de point de fusion ! passage progressif entre l'état solide et l'état liquide.

Composition

- Structure de silice (SiO_2) introduite sous forme de sable.
- Oxydes métalliques pour modifier les propriétés physiques.

	Composition [%]							
	SiO_2	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	PbO	B_2O_3	Al_2O_3
Silice fondue (Quartz)	>99.5							
Borosilicate (Pyrex)	80.5	3.8	0.4				12.9	2.2
Borosilicate (soudable au Kovar)	68.9	2.8	4.4			0.2	21.4	2.3
Sodocalcique (verre ordinaire)	73.0	13.0		10.0	2.0			1.0
Verre au plomb (Cristal)	55.5		11.0			33.0		
Aluminosilicate	57.0	1.0		5.5	12.0		4	20.5

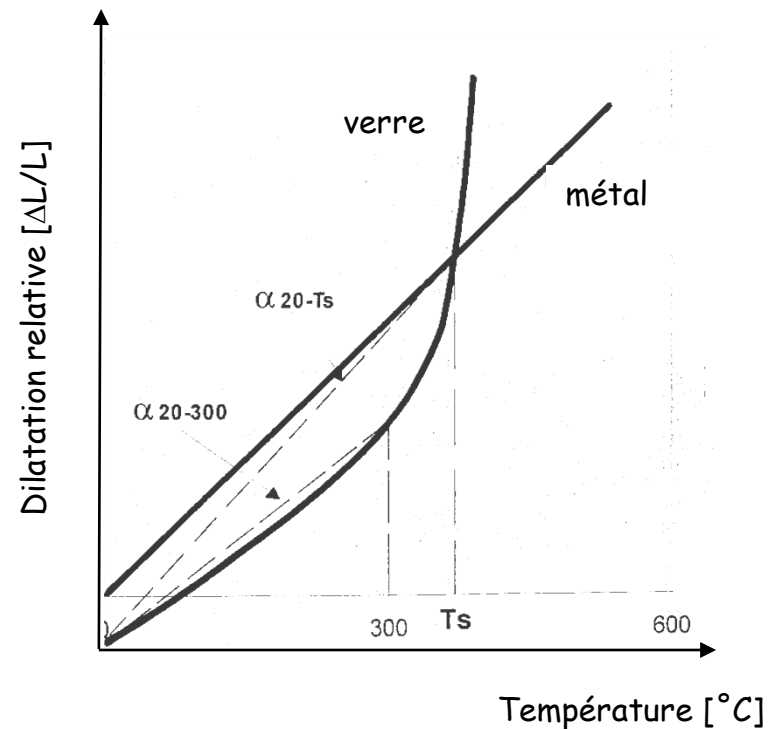
- Grand pourcentage de SiO_2 → température de ramollissement élevée, faible coefficient de dilatation (bonne résistance aux chocs thermique).
- Ajout d'oxydes de Co, Fe, Cu, Se, Cr → coloration du verre.

Dilatation des verres

- Facteur important à connaître pour l'évaluation des contraintes lors d'assemblages de différents verres et verres - métaux.
- Dilatation linéaire $\Delta L = L_0 \alpha \Delta T$
 α : coefficient de dilatation linéaire
- Dilatation volumique $\Delta V = V_0 \beta \Delta T$
 β : coefficient de dilatation volumique ($\beta \sim 3\alpha$)
- La dilatation des verres est faible comparée à celle des métaux ou matières plastique.

α (20-300°C)

Quartz:	0.54×10^{-6}
Pyrex:	3.2×10^{-6}
Verre ordinaire:	9.2×10^{-6}
Kovar (Ni/Co/Fe):	5.5×10^{-6}
Alu:	24×10^{-6}

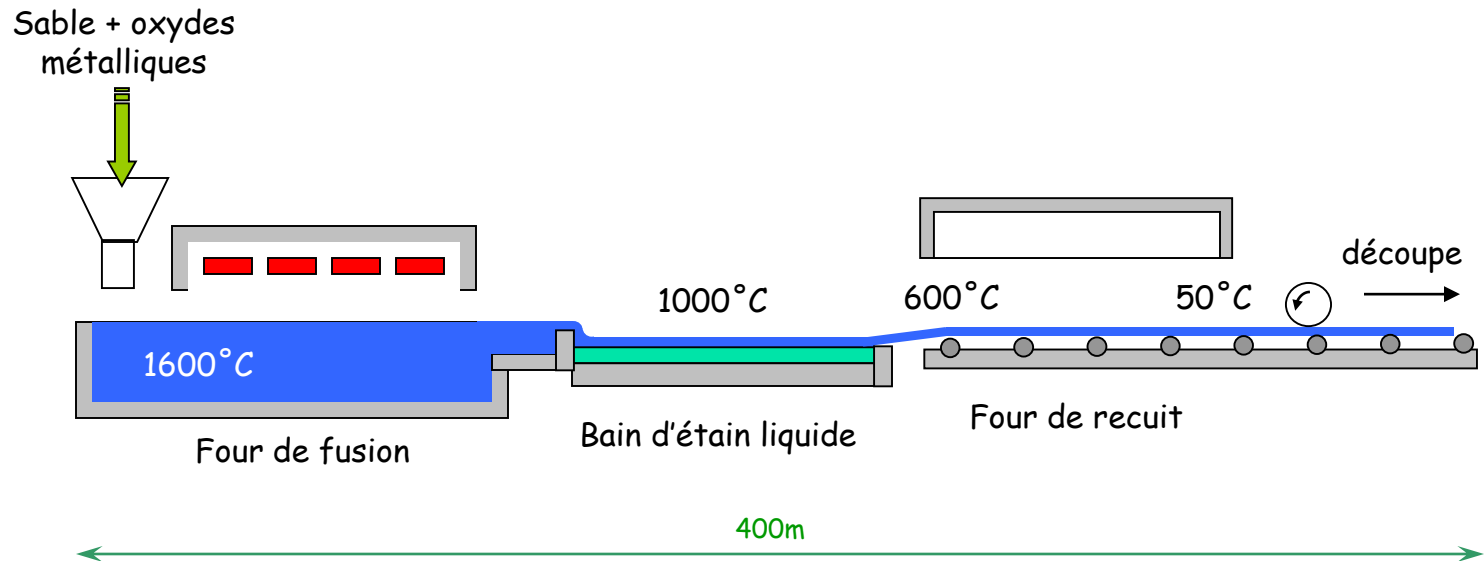


T_s : température de transformation
($\log n = 13.3$ poises)

Fabrication du verre plat

- Procédé "float" pour la fabrication du verre à vitre:

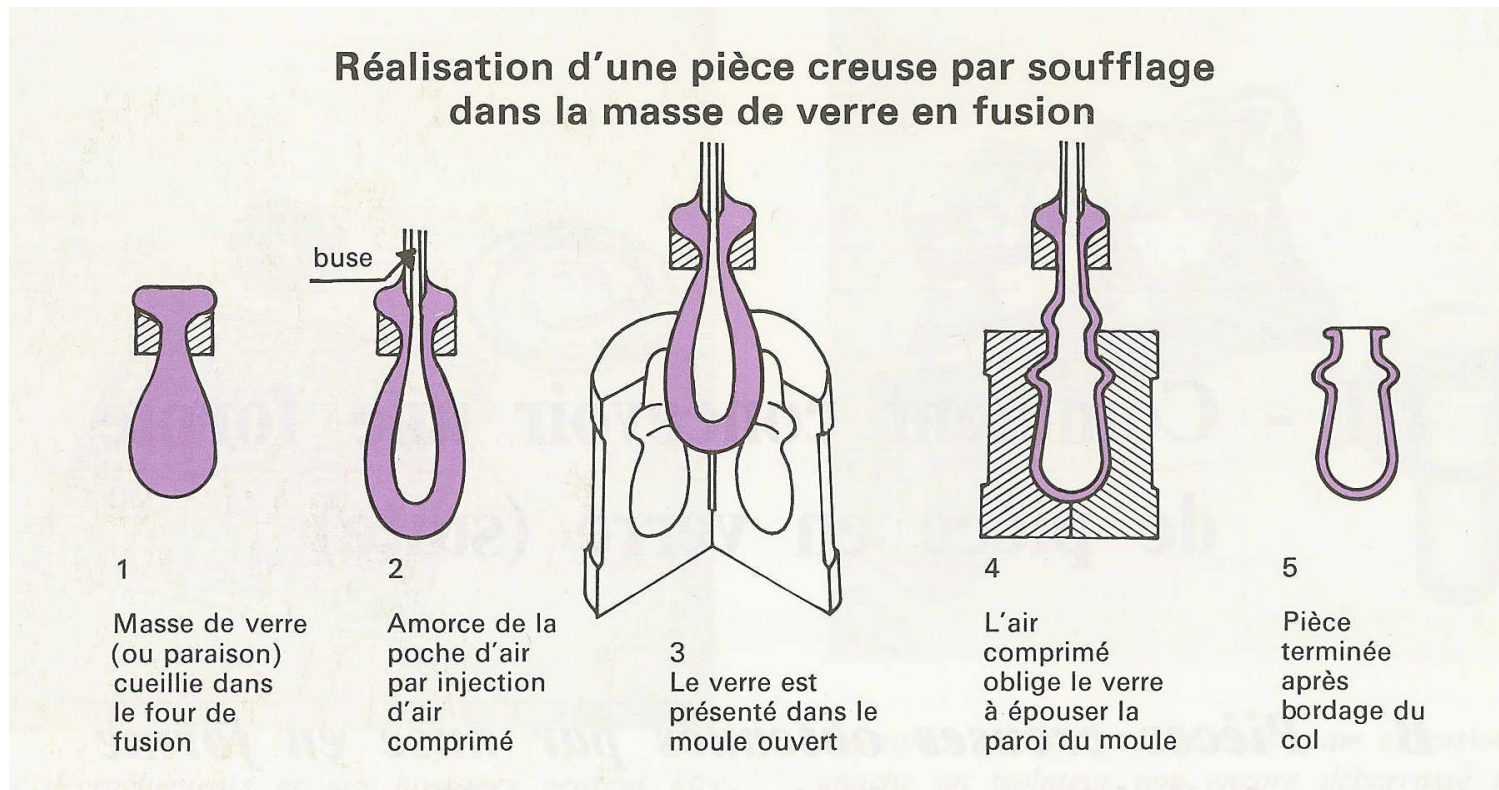
Le verre "flotte" sur un bain d'étain liquide pour conserver son état de surface naturel



- Verre mince (épaisseur $< 2\text{mm}$) obtenu par étirage
- Verre épais (épaisseur $> 22\text{mm}$) obtenu par coulée sur une table réfractaire.

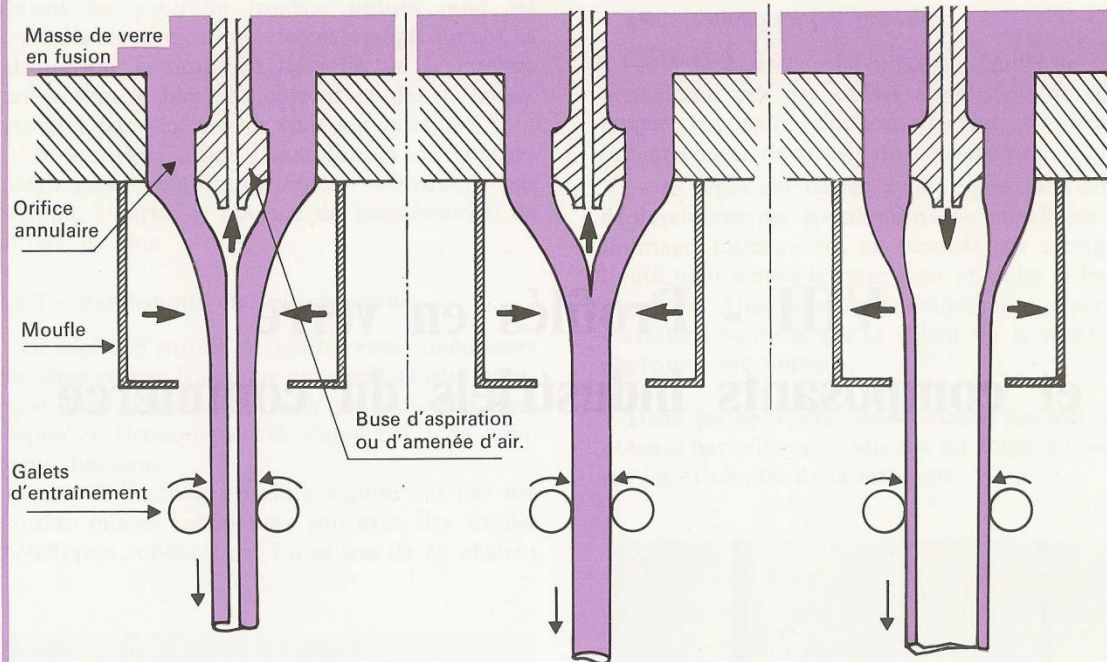
Fabrication du verre creux

- Par pressage, soufflage ou combinaison des deux



Fabrication des tubes

Schéma de principe de l'étirage du tube et des ronds (1)



Exemple n° 1 - une certaine pression d'air est créée à l'intérieur du moufle tandis qu'une légère dépression agit à l'intérieur du tube, rétrécissant le diamètre intérieur.

Exemple n° 2 - La dépression est accentuée à l'intérieur du tube, rapprochant les parois jusqu'à les ressouder. On obtient ainsi un profilé rond (ex. : baguette). Entre l'exemple n° 1 et celui-ci on passe par le stade des tubes capillaires.

Exemple n° 3 - On agit à l'inverse avec une pression exercée par la buse conjuguée avec une légère dépression dans le moufle. Lorsque la pression différentielle est la plus forte on obtient un tube à parois minces.

(1) Dans les trois exemples la pression différentielle se combine avec la vitesse d'étirage pour donner le diamètre et l'épaisseur définitifs, pour un orifice annulaire donné.

Le soufflage du verre

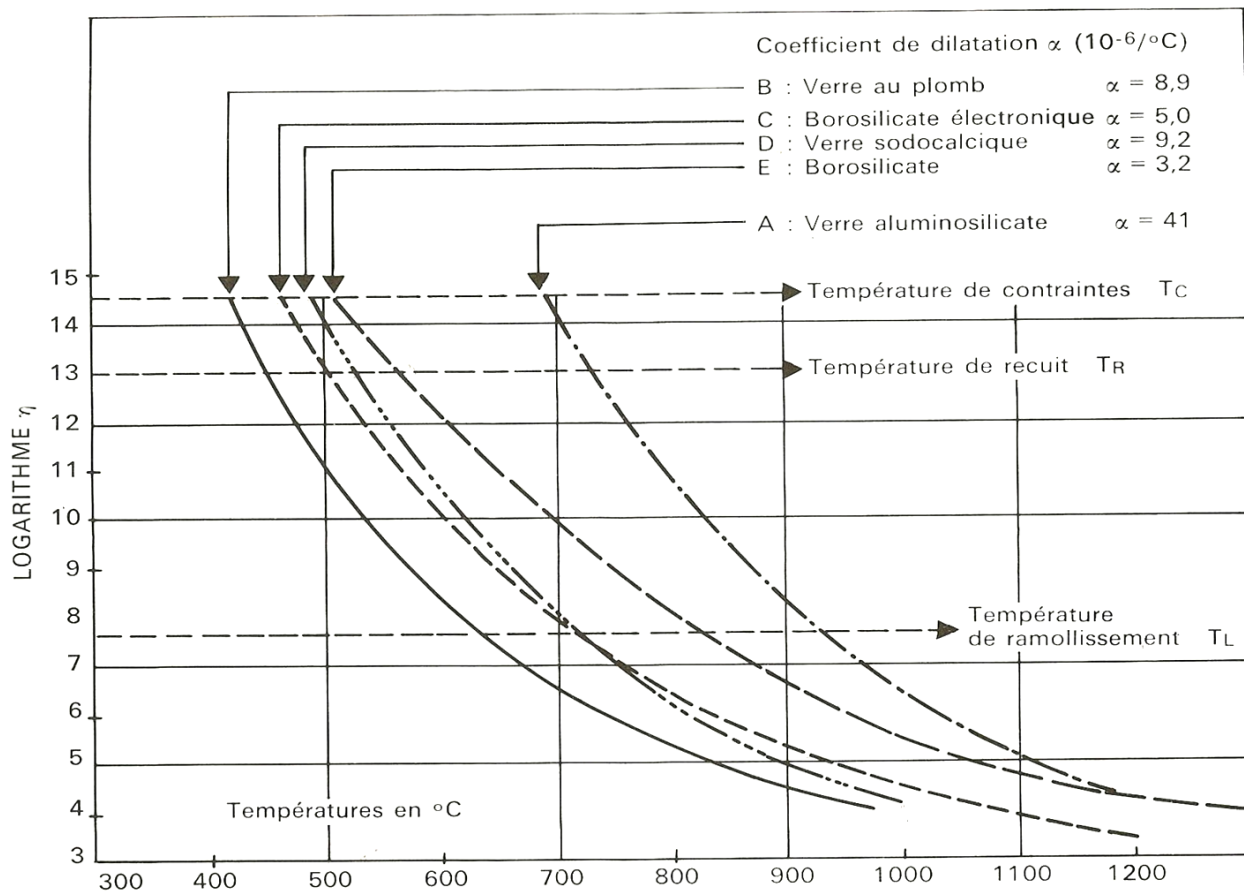
- Principalement avec un verre borosilicate (Pyrex, Duran50): faible dilatation, résistance au choc thermique, résistance aux agents chimiques.
- Utilisation de la silice fondue (quartz) pour des applications à haute température.



- Température de travail du Pyrex = 1260°C → tensions internes importantes, la pièce soufflée doit être recuite !

Propriétés thermoplastiques

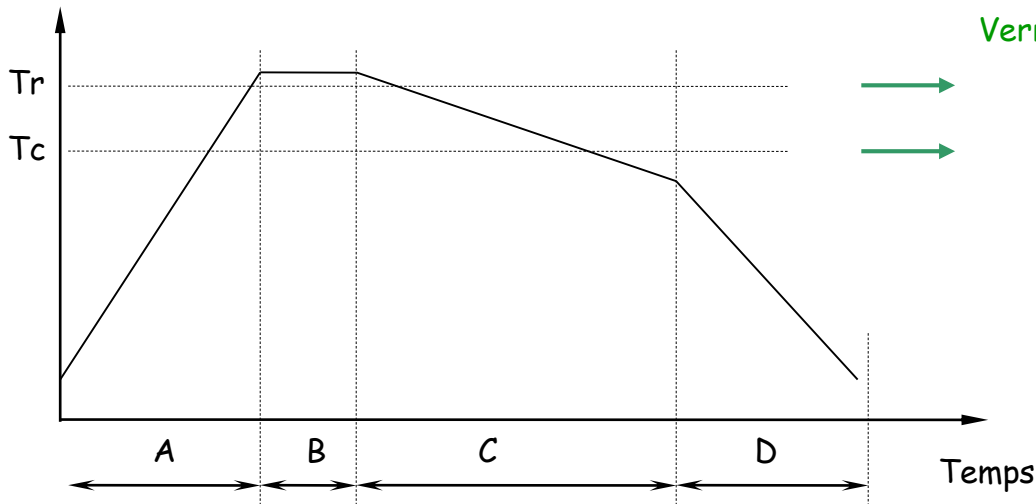
- La viscosité des verres varie de façon continue avec la température
- L'unité de viscosité est la poise $[\eta]$. 1 poise = 0.1 pascal.seconde (Pa.s)



Le recuit

- Pour relâcher les tensions internes: Chauffer le verre 5°C au-dessus de la température de recuit (T_r) et refroidir très lentement jusqu'à 20°C au-dessous de la température de contrainte (T_c).

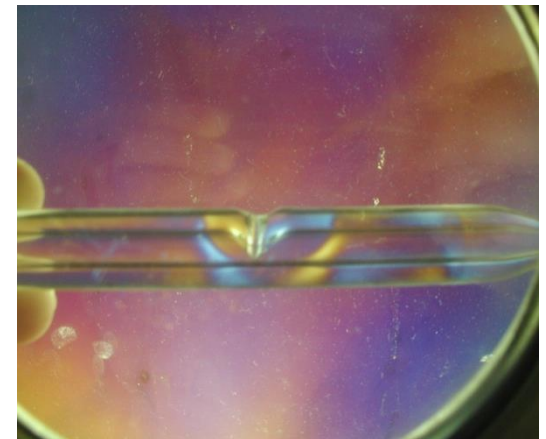
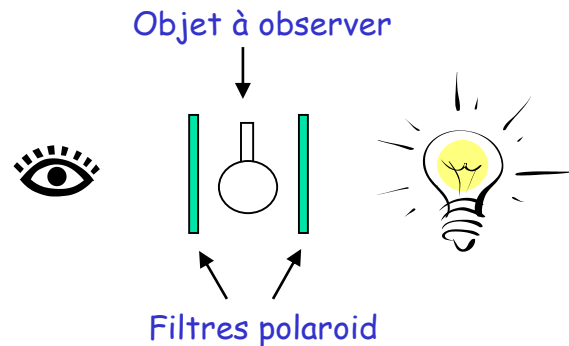
Température



	Verre ordinaire	Pyrex	Quartz
T_r	515°C	555°C	1140°C
T_c	475°C	515°C	1000°C

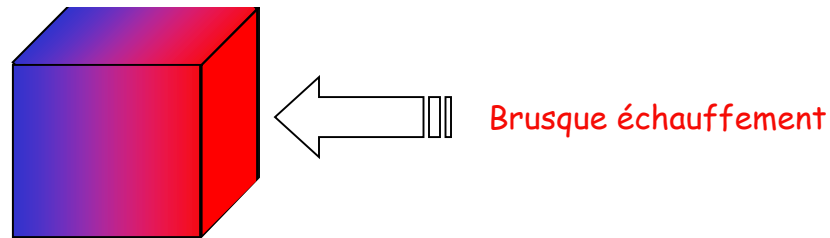
Les temps A, B, C et D dépendent de la Nature et de l'épaisseur du verre.
 Pour le pyrex de 12mm: $A=8^{\circ}\text{C}/\text{min}$;
 $B=30\text{min}$; $C=0.8^{\circ}\text{C}/\text{min}$

L'observation des tensions est possible avec la lumière Polarisée !



Choc thermique

Rupture suite à un écart de température important entre deux zones proches d'une pièce en verre.



- Le verre est un mauvais conducteur de chaleur

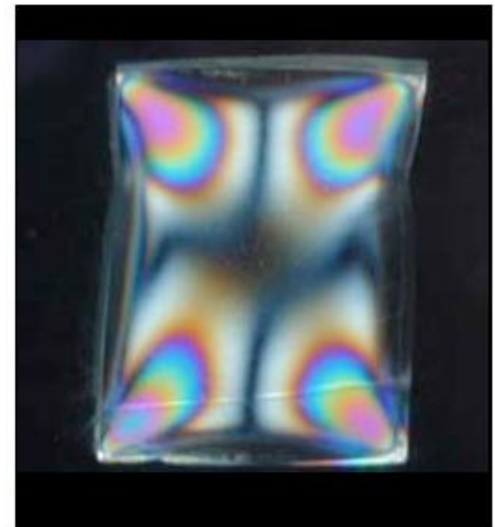
Rapide élévation de température → La surface dilate avant que le "cœur" ne devienne chaud.
Refroidissement trop rapide → La surface se contracte avant que le " cœur " ne refroidisse.

Tensions excessives → Casse !

- Pour limiter les risques de rupture dus au choc thermique:
 - Utiliser un verre mince
 - Choisir un verre avec un faible coefficient de dilatation
 - Supprimer les angles vifs et les amorces de rupture

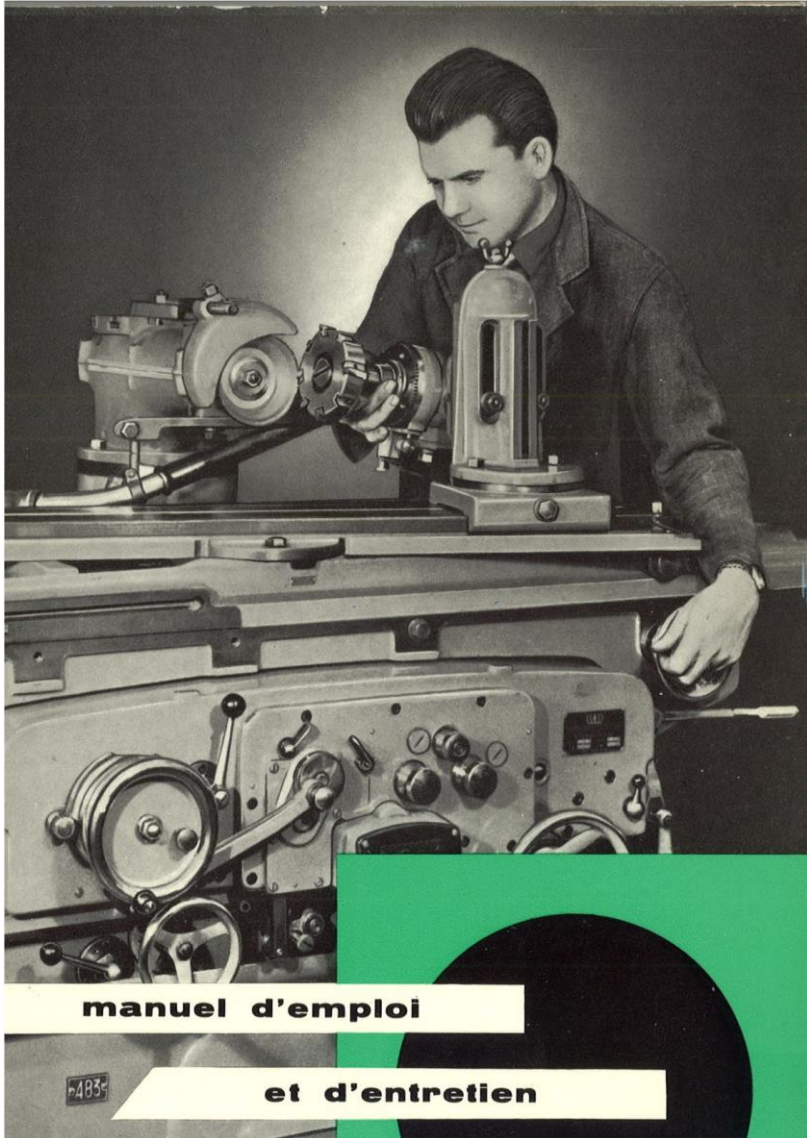
Le verre trempé

- Résultat d'un chauffage à 650 °C (pour un verre ordinaire) suivi d'un refroidissement rapide.
- Changement dans la structure du verre et renforcement de la résistance mécanique. Quatre fois plus résistant qu'un verre non trempé.
- Des grande contraintes internes sont introduites. La surface du verre est en compression et le cœur est soumis à des contraintes de traction.
- En cas de rupture, brutale fragmentation en de nombreux morceaux projetés dans l'espace.



Observation d'un objet en verre trempé en lumière polarisée. la présence de contrastes indique une biréfringence du verre induite par les contraintes internes.

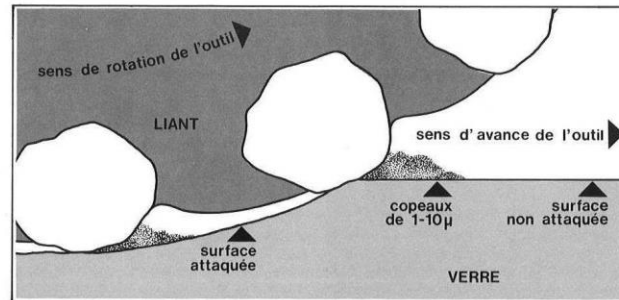
L'usinage du verre



manuel d'emploi

et d'entretien

description de l'outil diamanté et conditions de travail



Processus de travail de l'outil diamanté

Le travail du verre exige, dans la plupart des cas, l'utilisation d'outils à concrétion diamantée, c'est-à-dire d'outils dans lesquels le diamant est mélangé soit à une poudre métallique frittée, soit à un liant résine.

Le mécanisme de travail d'un tel outil est illustré ci-contre : le diamant, élément dur, enlève le verre par copeaux; ceux-ci exercent une action abrasive sur le liant et sur le diamant avant leur évacuation par le liquide réfrigérant.

Ce processus, régi par des paramètres d'utilisation appropriés, permet l'auto-avivage de la concrétion et l'utilisation rationnelle du diamant.

Composition des outils diamantés

Grosseur des grains de diamant

La grosseur des grains de diamant est déterminée par deux facteurs : la qualité de surface souhaitée et la quantité de matière à enlever.

Le rendement économique de l'outil diamanté augmentant avec la grosseur du grain utilisé, il y a lieu, pour des enlèvements de matière importants, de travailler en deux opérations : l'une d'ébauche avec de gros grains et l'autre de finition avec des grains fins.

L'influence de la grosseur du grain sur l'état de surface est exprimée par la figure 3.

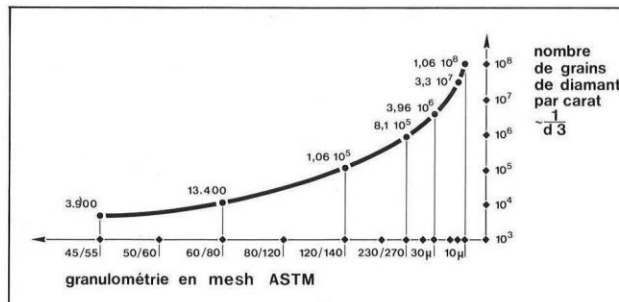
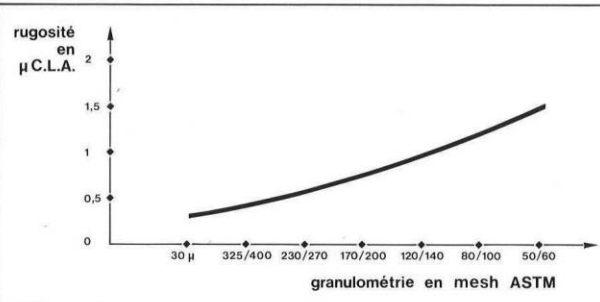
Le tableau figurant à la page suivante permet de comparer les codes de granulation les plus couramment utilisés.

Concentration du diamant

La concentration est le poids de diamant en carats (0,2 gr) contenu dans 1cm³ de concrétion. Les fabricants d'outils diamantés ont codifié leurs concentrations :

100 = 4,4 ct/cm³
75 = 3,3 ct/cm³
50 = 2,2 ct/cm³

Si la concentration est un élément déterminant de la valeur d'un outil, son choix est



L'usinage du verre

le forage

Le foret diamanté

Le forage à l'outil diamanté consiste, dans son principe, à faire pénétrer dans le matériau à travailler, par rotation et sous une certaine poussée, un tube à paroi mince dont l'extrémité est diamantée.

Le diamant y travaille sous un angle de coupe pratiquement nul, sa vitesse de pénétration étant négligeable par rapport à sa vitesse de rotation. Le diamant rode donc la matière, y creusant un sillon qui ira en s'approfondissant au point d'y découper une pastille centrale, communément appelée "carotte".

Les résidus du forage sont évacués au fur et à mesure de leur formation par l'eau qui est injectée sous pression par l'intérieur même du tube.

Paramètres de forage

Les facteurs qui influencent la pénétration du foret sont : son diamètre, sa vitesse de rotation, l'épaisseur de sa paroi diamantée, la composition de cette couronne diamantée, la poussée exercée sur l'outil et la pression de l'eau.

Le diamètre

Plus le diamètre est grand, plus la surface en contact avec la matière est grande et plus la pression exercée sur l'outil devra être élevée. C'est pour limiter cette poussée tout en conservant une pression spécifique suffisante que l'on a recours, à partir d'un certain diamètre (120-150 mm) à des forets dont la surface active est réduite : la couronne continue fait place à la couronne segmentée.

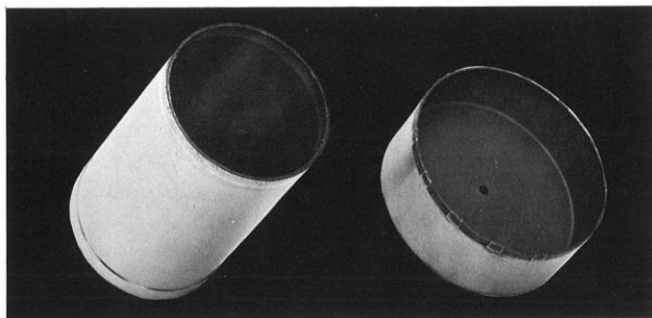
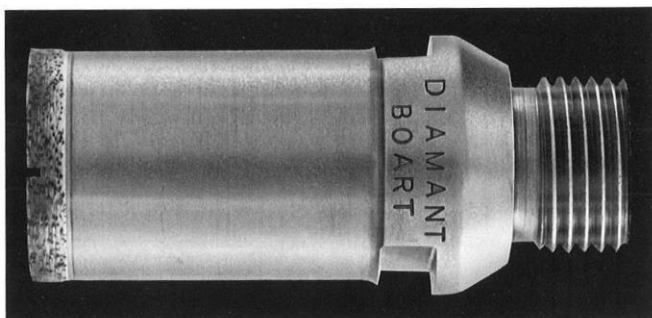
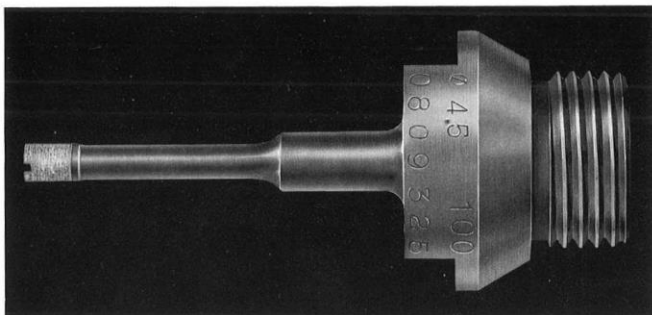
La vitesse de rotation

Elle varie en fonction du diamètre de manière à conserver une vitesse linéaire comprise entre 1,5 et 2,5 m/s :

Diamètre du foret	Vitesse de rotation
2 à 5 mm	8000 à 6000 tr/min
6 à 10 mm	6000 à 4500 tr/min
11 à 20 mm	4500 à 3000 tr/min
21 à 40 mm	3000 à 1500 tr/min

L'épaisseur de la couronne diamantée

L'épaisseur de la couronne diamantée qui garnit le foret est communément de 1 mm, tandis que l'épaisseur du tube qui constitue le corps du foret n'est que de 0,6 mm.



le sciage

Il y a lieu de distinguer ici trois domaines d'application :

- le sciage du verre plat
- le sciage des volumes creux
- le sciage du verre optique.

Les types d'outils utilisés en fonction des applications sont des disques à jante continue d'un diamètre allant de 150 à 400 mm, et des disques à dents d'un diamètre maximum de 500 mm.

Le sciage du verre plat

Utilisé sur machine fixe ou portable, le disque diamanté est appelé à débiter des épaisseurs de verre variant de 10 à 40 mm.

Disques utilisés

Sur machines portatives : en principe uniquement des disques à jante continue de 150 mm de diamètre.

Sur machines fixes : disques à jante continue de diamètre maximum 400 mm, ou disques à segments - d'une surface active de l'ordre de 90 % - pour le sciage du verre feuilleté.

Conditions d'utilisation

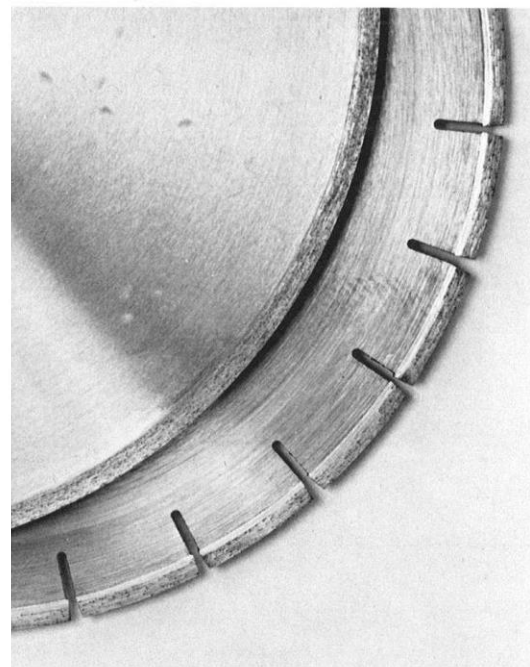
Vitesse périphérique : 25 à 35 m/s.
Vitesse de coupe : 150 à 200 cm²/min.
Arrosage : eau + huile soluble si possible, abondant et bien dirigé.
Il convient de noter ici que les encoches des disques à dents favorisent la répartition du réfrigérant ainsi que l'évacuation des débris de sciage.

Rendements

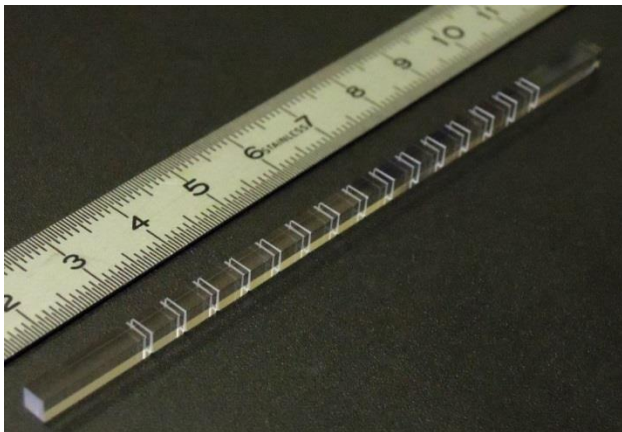
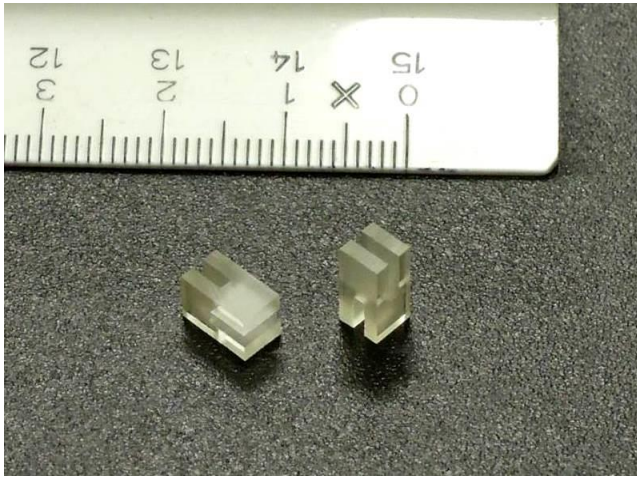
Le rendement varie en fonction de la qualité et de l'épaisseur du verre, de sorte que les chiffres qui suivent ne sont donnés qu'à titre indicatif. Il faut également tenir compte du fait que les machines sont pourvues d'une table à avance manuelle.
Rendement moyen des disques à jante continue de Ø 150 mm : de 5 à 7 m² pour une hauteur diamantée utilisable de 5 mm.
Rendement moyen des disques à dents de Ø 300 mm : 20 à 30 m² pour une hauteur diamantée utilisable de 5 mm.

Cas particuliers

Verre armé, plat ou ondulé : aucune difficulté particulière de sciage.
Verre feuilleté : ce verre, souvent utilisé en



L'usinage du verre



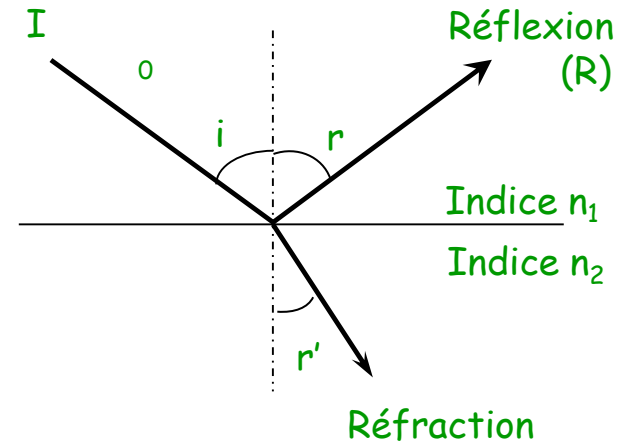
- Rodage sciage polissage avec des utiles Diamant. Les grain de diamant sont pris dans un liant de bronze.
- Forage / perçage avec des utiles spécial « carotte »
- Usiner en haute vitesse.
- Refroidissement avec l'eau (3% l'huile minéral)
- Fixation des pièces avec une sorte de cire pour limiter le stress dans la matière
- Normalement temps d'usinage bien plus long (comparer avec les métaux).

L'indice de réfraction

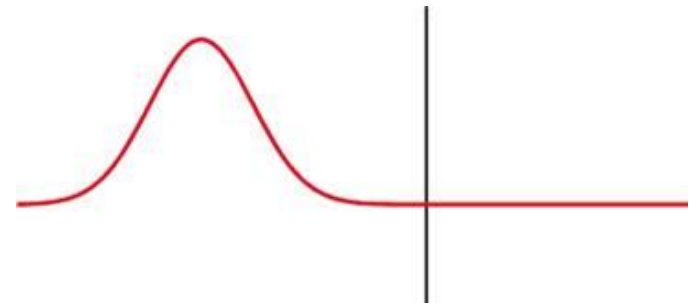
- Exprime le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu de propagation.

Lois de Snell-Descartes:

- Les rayons réfléchis et réfractés sont dans le plan d'incidence.
- L'angle d'incidence i est égal à l'angle de réflexion r .
- L'angle d'incidence i et l'angle de réfraction r' sont liés par la relation : $n_1 \times \sin i = n_2 \times \sin r'$



Facteur de réflexion (Fresnel) :
$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

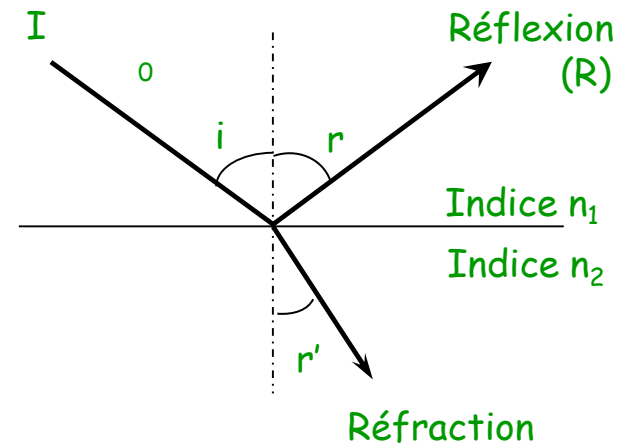


L'indice de réfraction

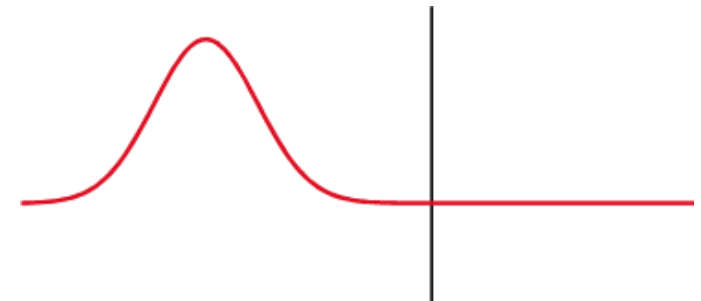
- Exprime le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu de propagation.

Lois de Snell-Descartes:

- Les rayons réfléchis et réfractés sont dans le plan d'incidence.
- L'angle d'incidence i est égal à l'angle de réflexion r .
- L'angle d'incidence i et l'angle de réfraction r' sont liés par la relation : $n_1 \times \sin i = n_2 \times \sin r'$

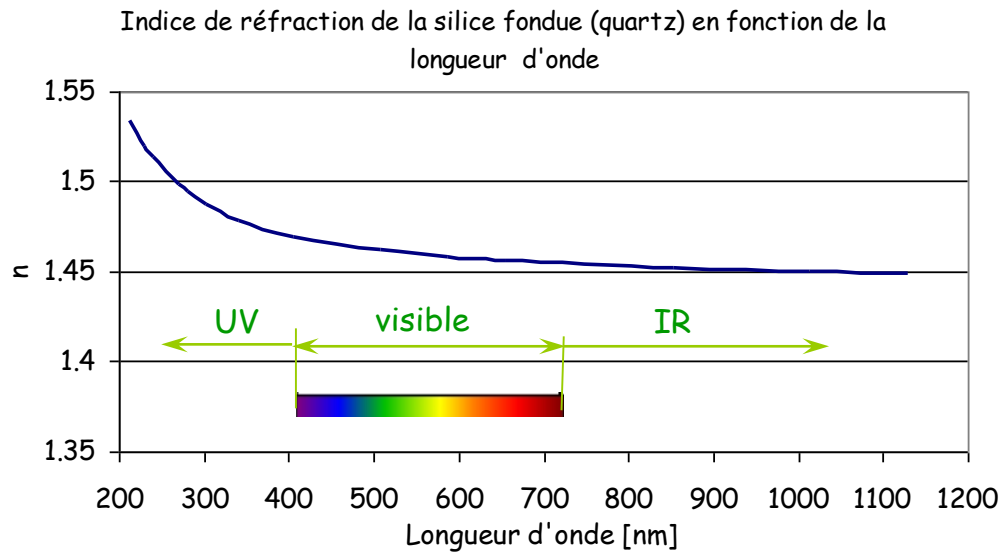


Facteur de réflexion (Fresnel) :
$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$



La dispersion

- Variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde



Dispersion de la lumière dans un prisme:

Indice de réfraction plus grand pour la lumière bleue (450nm) que pour la lumière rouge (600nm)

La dispersion est caractérisée par:

- la dispersion principale: $n_F - n_C$

- Le nombre de ABBE :
$$V_D = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

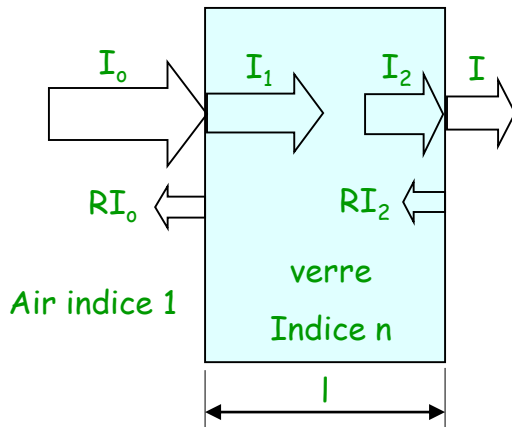
$n_F = 486.13\text{nm}$ → raie bleue de l'hydrogène

$n_C = 656.27\text{nm}$ → raie rouge de l'hydrogène

$n_d = 587.56\text{nm}$ → raie jaune de l'hélium

La transmission optique

- Rapport du flux transmis sur le flux incident $T=I/I_0$

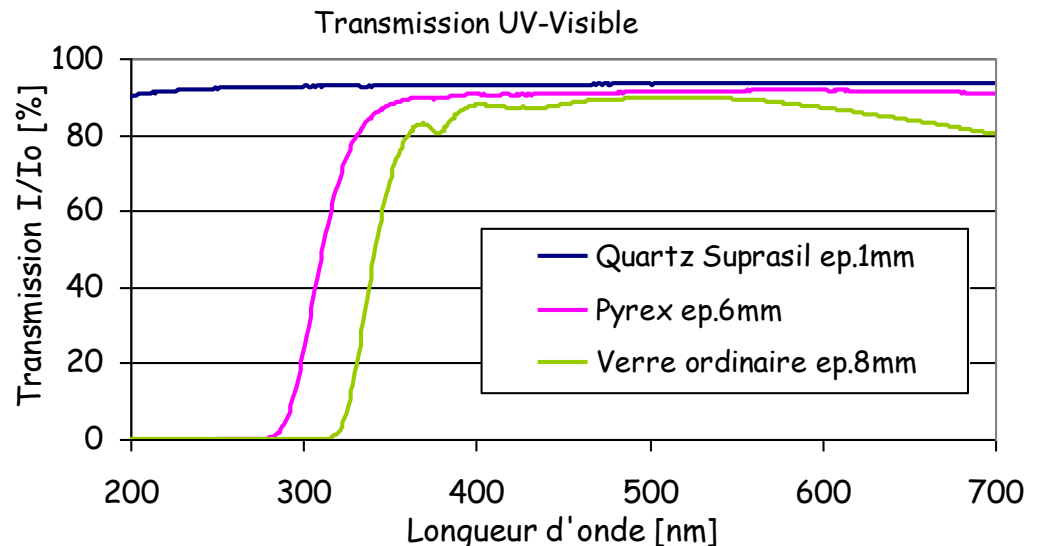


$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad I_1 = I_0 - RI_0 \quad I = I_2 - RI_2$$

$$I_2 = I_1 e^{-kl}$$

k : coefficient d'absorption (dépend du type de verre).
 l : épaisseur.

- La transmission varie en fonction de la longueur d'onde.
- Le quartz est transparent dans l'UV jusqu'à 160nm.



La transmission optique

Spectra From Common Sources of Visible Light

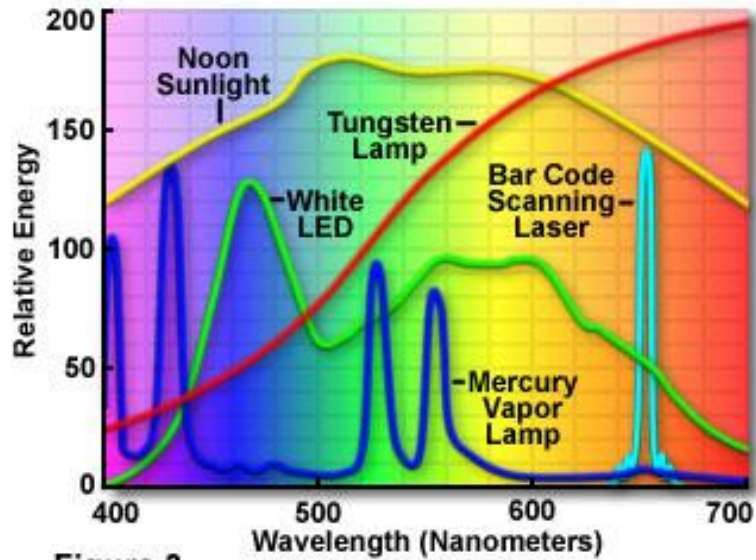
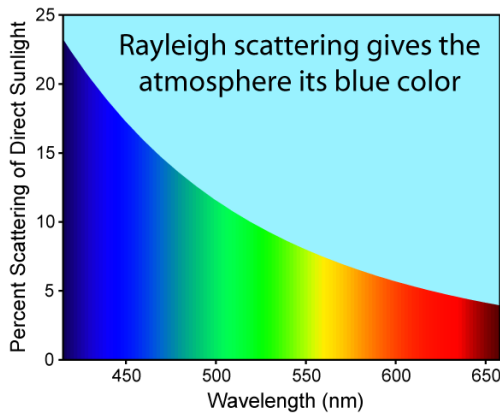
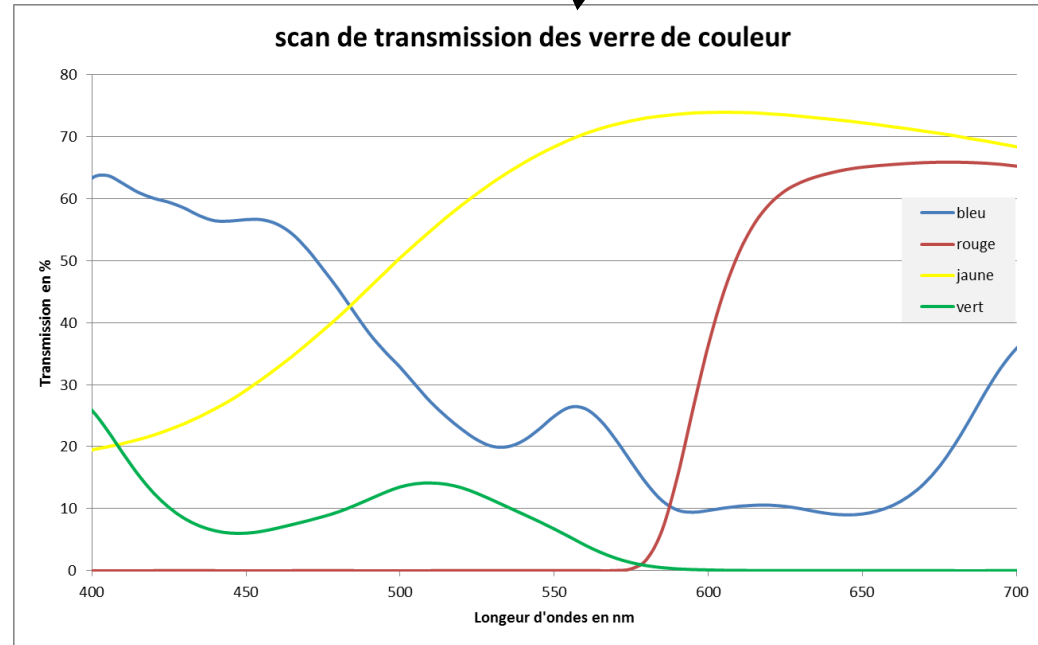


Figure 3

← Spectre des différents sources de lumière

Transmission des différents verres de couleur.



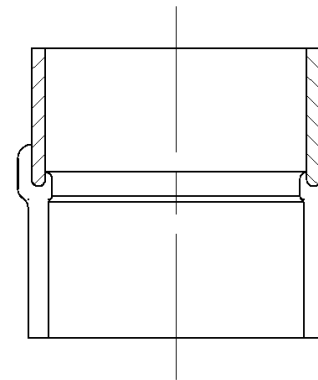
← Diffusion de la lumière dans l'atmosphère

Les assemblages verre-métal soudés

- Le verre peut être soudé sur un métal préalablement oxydé
- Le métal doit avoir un coefficient de dilatation très proche de celui du verre.
- Le métal le plus fréquemment utilisé est le Kovar (alliage Fe, Ni et Co)



Soudure tubulaire



Kovar $\alpha=4.81 \times 10^{-6}$

Verre borosilicate
Schott 8250 $\alpha=5 \times 10^{-6}$

Passage électrique, traversées étanches:

