

## PROBABILITE DE LA RESISTANCE MECANIQUE DU CRISTAL SOUMIS A UN CHOC THERMIQUE

Reçu le 03/03/2003 – Accepté le 26/07/2003

### Résumé

Nous avons mesuré la résistance à la rupture du cristal soumis à un choc thermique et sa variation en fonction de la teneur en oxyde de plomb. Nous avons utilisé le dispositif « Barres d'Hopkinson » pour mesurer la contrainte de rupture sous chargement dynamique. La contrainte due à un choc thermique dans le cristal a été calculée par la méthode des éléments finis « CASTEM2000 ». En considérant que la contrainte due à un choc thermique résulte d'un chargement dynamique, nous avons comparé la contrainte thermique à la contrainte de rupture dynamique pour déterminer sa résistance au choc.

En tenant compte des résultats obtenus, nous avons déterminé la variation théorique de la résistance du cristal en fonction de la teneur en oxyde de plomb plus faible et un complément d'oxyde de sodium. L'approche probabiliste nous a permis de déterminer la teneur critique en oxyde de plomb.

**Mots-clés :** cristal, choc thermique, rupture dynamique, Barres d'Hopkinson, teneur en oxyde de plomb, approche probabiliste.

### Abstract

We measured the breaking strength of the crystal subjected to a thermal shock and its variation according to the content lead oxide. We used device "Sprit Hopkinson Bar" to measure the breaking stress under dynamic loading. The stress due to a thermal shock in the crystal was calculated by the finite element method. By considering that the constraint due to a thermal shock results from a dynamic loading, we compared the thermal stress with the dynamic breaking stress to determine its impact resistance. By holding account of the results obtained, we determined the theoretical variation of the resistance of the crystal according to the content weaker oxide lead and a complement of sodium oxide. The probabilistic approach enabled us to determine the critical content lead oxide.

**Keywords :** crystal, thermal shock, breaking dynamic stress, "Sprit Hopkinson Bars", content lead oxide, probabilistic approach.

J. JEONG  
H. ADIB  
G. PLUVINAGE

Laboratoire de Fiabilité Mécanique (LFM), Université de Metz  
Ile du Sauley  
57000 Metz, France

### ملخص

تم قياس المقاومة عند انشقاق بلور تحت صدمة حرارية وتغيره من خلال درجة اكسيد الرصاص. لقد تم استخدام جهاز قضيب (حاجز) هو بكنيسون لقياس ضغط الانشقاق تحت حمولة (شحنة) ديناميكية.

إن الضغط الصادر من الصدمة الحرارية في البلور قد تم حسابه بواسطة طريقة الوحدات المنتهية "CASTEM 2000". وباعتبار أن الضغط الصادر عن الصدمة ناتج عن حمولة جيناميكية، لقد تم مقارنة الضغط الحراري بضغط الانشقاق الديناميكي لتحديد مقاومة الصدمة. وبناء على النتائج المتحصل عليها، لقد تم تحديد التغير النظري لمقاومة البلور تبعاً لمقداره (درجته) من أكسيد الرصاص بصفة ضعيفة مع ملحق (مكمل من أكسيد السوديوم). سمحت المقارنة الإحصائية بتحديد الدرجة الحرجة لأكسيد الرصاص.

**الكلمات المفتاحية:** البلور – الصدمة الحرارية – انشقاق الديناميكي – قضيب هو بكنيسون – درجة مقدار أكسيد الرصاص – المقارنة الإحصائية.

La protection de l'environnement conduit à envisager de réduire la teneur en oxyde de plomb dans le cristal à une échéance certaine mais indéterminée dans les pays de l'Union Européenne. Le remplacement de l'oxyde de plomb par d'autres oxydes a des conséquences sur les propriétés physiques et les propriétés mécaniques du matériau [1, 2]. C'est ainsi que le coefficient de dilatation et la résistance à la rupture vont être modifiés. L'augmentation du coefficient de dilatation thermique accroît les risques de choc thermique lors de toute opération de lavage à l'eau chaude. La contrainte due à un choc thermique a une origine différente par rapport à la contrainte thermique en soit.

Elle apparaît si le matériau soumis à une température homogène n'est pas libre de se déplacer ("bridage") tandis que la contrainte due à un choc thermique apparaît à cause du gradient de température dans le matériau. Le cristal est un matériau fragile qui peut devenir extrêmement sensible sous l'effet d'un choc thermique à cause de sa faible valeur de conductivité thermique. Les contraintes dues à un choc thermique peuvent devenir suffisamment élevées pour dépasser la valeur de la résistance à la rupture. Elles sont considérées comme issues d'un chargement dynamique qui génère une onde de choc [13].

Pourtant, la plupart des travaux concernant le choc thermique ne tiennent pas suffisamment compte de la vitesse du chargement [4, 5].

Sous l'effet d'un chargement dynamique, la résistance du cristal n'est pas intrinsèque au matériau mais dépend de la durée du chargement [6-8]. La

contrainte de rupture du cristal sous le chargement dynamique a été mesurée expérimentalement à l'aide d'un dispositif du type « Barres d'Hopkinson ». La contrainte due à un choc thermique a été trouvée par la méthode des éléments finis CASTEM2000. En tenant compte des résultats obtenus, nous avons déterminé la variation théorique de la résistance du cristal en fonction d'une teneur en oxyde de plomb à laquelle on substitue de l'oxyde de sodium.

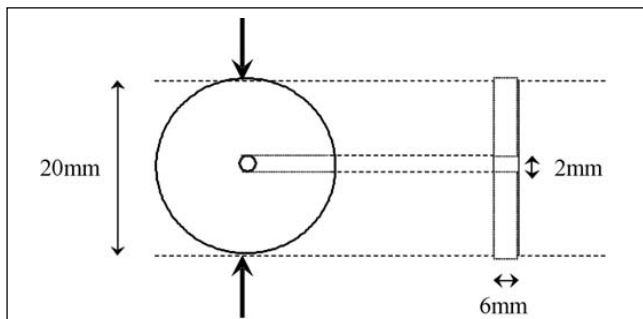
Enfin, une approche probabiliste de la rupture à l'aide de la « Loi Normale » permettra de trouver la valeur critique de la teneur en oxyde de plomb.

**1- EPROUVETTE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL**

**1.1- Eprouvette**

L'éprouvette disque brésilien a été utilisée pour déterminer la résistance à la rupture du cristal. Cette éprouvette est préférée aux éprouvettes utilisées habituellement pour les essais de flexion 3 ou 4 points en raison de sa distribution homogène des contraintes sur une grande partie du ligament [8].

La Figure 1 présente la géométrie du disque.



**Figure 1:** Géométrie du disque: de face (à gauche), de profil (à droite).

La perforation au centre du disque est nécessaire pour localiser la rupture. Toutefois, on constate l'existence d'un désaccord sur l'interprétation physique des mécanismes qui gouvernent la rupture, notamment la localisation du point d'amorçage des fissures. Dans ce type d'éprouvette, l'application d'une compression sur la ligne directrice du disque engendre une traction perpendiculaire par rapport à cette ligne directrice. La rupture se produit si la contrainte d'ouverture atteint une valeur critique  $\sigma_r$ .

Dans l'essai statique, la rupture est faite par fendage tandis que pour l'essai dynamique, elle se produit par multiple fragmentation (Fig. 2).



**Figure 2:** Rupture statique à gauche et dynamique à droite.

L'expression de la contrainte critique  $\sigma_r$  d'un anneau [10] est donnée par l'équation (1) :

$$\sigma_r = \frac{2.k.P_r}{L.D.\pi} \tag{1}$$

- $k$  : coefficient du facteur de concentration contrainte ;
- $P_r$  : chargement maximal ;
- $L$  : diamètre du disque ;
- $D$  : diamètre du trou.

**1.2- Cristal**

Des échantillons nous ont été fournis. Ces échantillons ont une forme d'anneau dont le diamètre est de 20mm, celui du trou étant de 2mm et l'épaisseur 6mm (Fig. 1).

La composition chimique de ce cristal est la suivante (Tab.1) :

Composition chimique	SiO <sub>2</sub>	PbO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Oxyde (%)	58	28.85	5.43	6.73

**Tableau 1:** Composition chimique du cristal.

Il existe une formule de type « Relation d'additivité » [1, 2] qui permet de calculer les propriétés mécaniques de ce cristal à partir des propriétés mécaniques pour chaque élément de sa composition chimique :

$$X = \sum_{i=1}^n C_i X_i \tag{2}$$

- $C_i$  : coefficients qui déterminent la proportion de chaque composant ;
- $X_i$  : facteurs qui représentent la contribution à la propriété  $X$  d'un composant.

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau 2 où  $E$  est le module de Young,  $\nu$  le coefficient de Poisson et  $\alpha$  le coefficient de dilatation thermique.

Propriétés mécaniques	E (MPa)	$\nu$	$\alpha$ (*10 <sup>-6</sup> /°C)
Valeurs	5900	0.18	9.1

**Tableau 2:** Propriétés mécaniques du cristal.

**1.3- Dispositif d'essai : Barres d'Hopkinson**

Dans le domaine statique, la contrainte de rupture du cristal a été mesurée à l'aide d'une machine universelle de traction et de compression. Elle est reliée à un ordinateur par une interface numérique. Le plateau se déplace verticalement et comprime l'échantillon. Le déplacement est donné par un capteur installé dans la machine.

La contrainte de rupture dynamique est déterminée par un dispositif « Barres Hopkinson » [11] (Fig.3). Le dispositif comprend un projectile, 2 barres (incidente et transmise) et un amortisseur. Le projectile est lancé à l'aide d'un canon à air comprimé qui frappe la barre incidente. L'onde de compression élastique non dispersive ( $\sigma = \rho c v$ ,  $\rho$ : masse volumique,  $c$ : célérité,  $v$ : vitesse particulière) ainsi générée, traverse la barre incidente.

A cause de la différence d'impédance mécanique ( $\rho c$ ), une fois que cette onde arrive devant l'échantillon, une

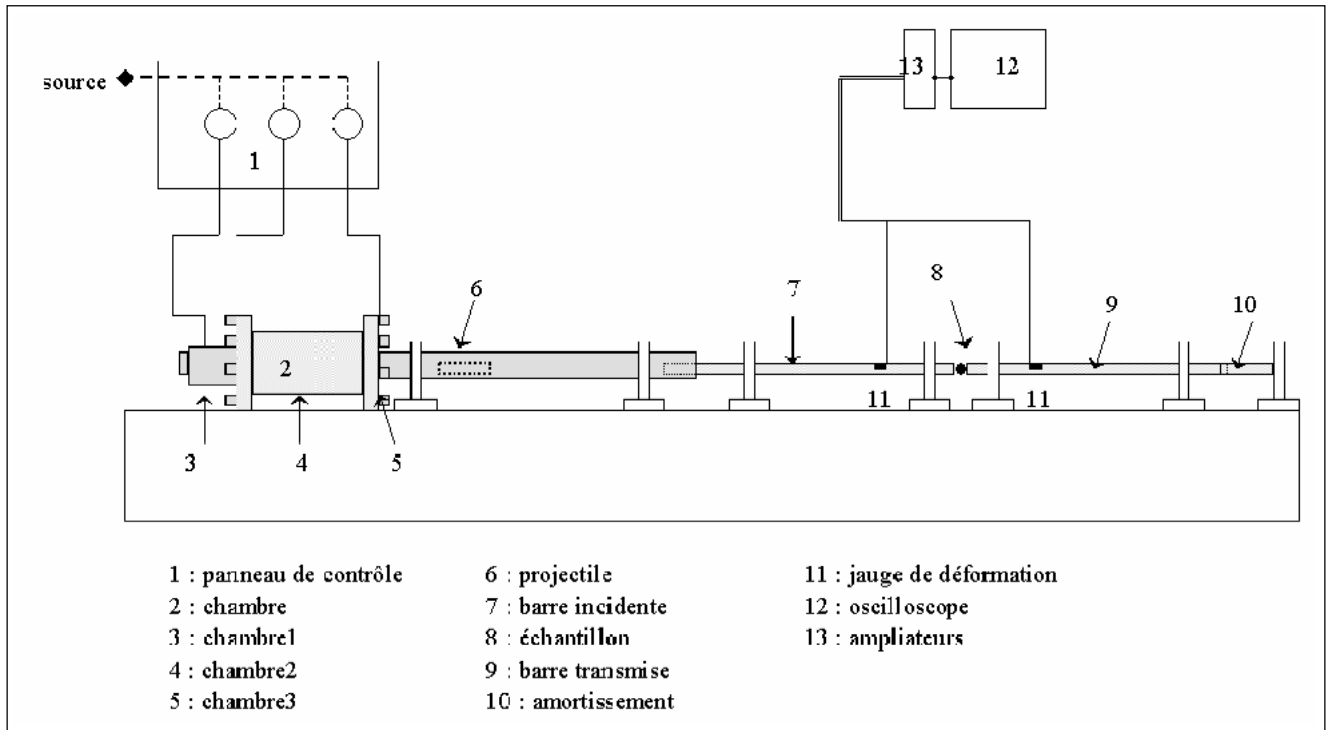


Figure 3: Dispositif de Barres d'Hopkinson pour la rupture dynamique.

partie de l'onde est réfléchiée dans la barre incidente et l'autre partie traverse l'échantillon en provoquant la rupture, puis est transmise sur la barre transmise. Deux jauges de déformation sont collées sur les barres. L'une est sur la barre incidente et enregistre l'onde appliquée, et la deuxième enregistre l'onde transmise. Ces deux ondes sont visualisées et enregistrées par un oscilloscope à travers un amplificateur.

#### 1.4- Résultats

Nos essais statiques et dynamiques présentent une grande dispersion (Tab.3). Cela provient de la présence aléatoire de défauts dans le cristal qui amorcent la rupture. Ce phénomène est aussi observé dans le verre float [8]. Nous avons constaté que la résistance du verre float a diminué en augmentant le volume de l'échantillon car la probabilité de trouver un défaut est proportionnelle à ce volume (Fig. 4). En outre, la contrainte de rupture n'est pas intrinsèque au matériau pour le chargement dynamique. Elle augmente lorsque le temps de rupture décroît. La rupture dynamique qui dépend de la durée du choc a été étudiée par différents auteurs et notamment Tuler et Butcher [6]. Ils ont proposé un critère pour lequel la rupture n'est pas instantanée mais nécessite un temps d'incubation pour l'amorçage des fissures à partir des micros-défauts. L'amplitude du pulse de contrainte de tension  $\sigma$  et sa durée d'application  $\Delta t$  sont reliées par l'équation suivante :

$$\sigma^\lambda \Delta t = C \quad (3)$$

où  $\lambda$  et  $C$  sont des constantes propres au matériau.

Nous pouvons utiliser la valeur  $\lambda$  ( $\lambda = 0.95$ ) et  $C$  ( $C = 3 \cdot 10^3$ ) à partir des résultats d'essais dynamiques réalisés. La contrainte de rupture dynamique du cristal se place sur la même courbe compte tenu de la dispersion.

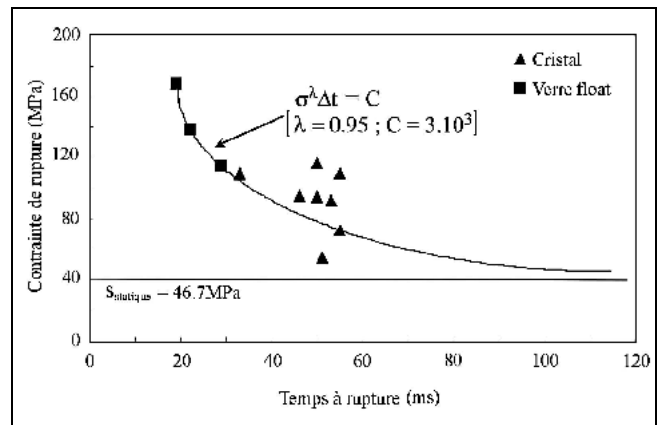


Figure 4: Présentation des valeurs de contrainte de rupture dynamique déterminée sur disque brésilien.

Type d'essai	Statique (MPa)		Dynamique (MPa)	
	Contraite	Ecart-type	Contraite	Ecart-type
Verre float [8]	96.3	13.6	165	-
Cristal	46.9	8.6	93	21

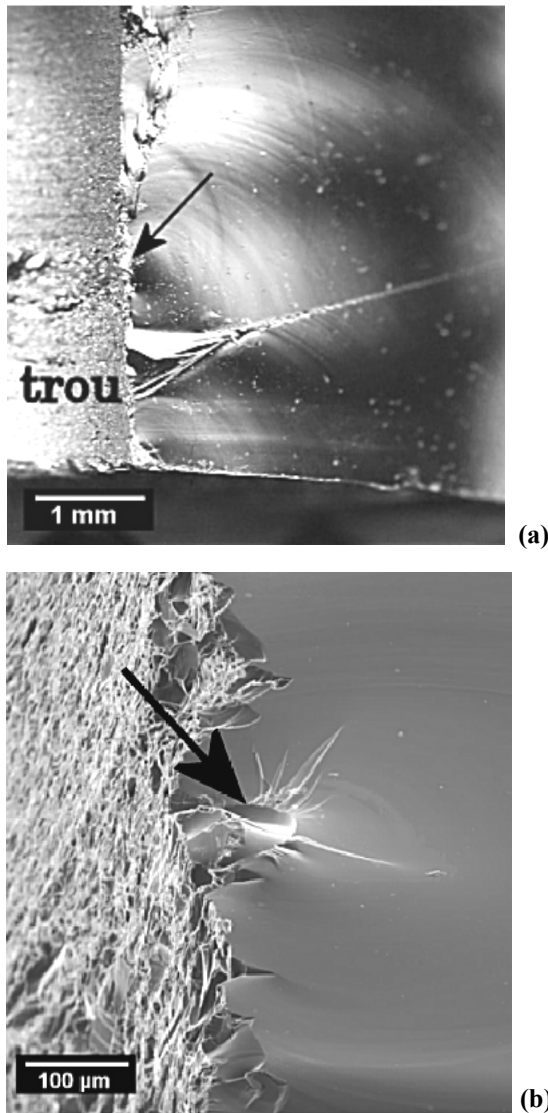
Tableau 3: Comparaison des résultats d'essai statique et dynamique entre le verre float et le cristal.

#### 1.5- Examen microscopique des surfaces de rupture

Dans le but de comprendre le processus de rupture, nous avons analysé la surface de rupture à l'aide d'un microscope électronique à balayage. Ces examens ont été

effectués avec l'aide de CRITT Matériaux-LNE Est à Schiltigheim (67). Dans le cas d'un essai sur disque brésilien, le calcul théorique de la distribution des contraintes montre une traction uniforme dans le plan contenant les génératrices suivant lesquelles s'appliquent les efforts. Dans le cas d'une éprouvette annulaire, cette distribution est perturbée par la présence du trou. En localisant la zone miroir sur la surface de rupture, l'observation au microscope optique montre que la fissure démarre effectivement à partir d'un défaut situé au voisinage du trou (Fig. 5a). L'examen au microscope électronique à balayage a mis en évidence le point de rupture (Fig. 5b). Nous remarquons les lignes de « Wallner » qui se propage à partir du point d'amorçage de la fissure vers l'extérieur du disque. Nous avons aussi observé la zone « Hackle » à côté des lignes de « Wallner ». Les autres parties de la surface de rupture ont été également examinées.

Le processus de rupture est identique pour toutes nos éprouvettes.



**Figure 5:** Localisation des zones d'amorçage des fissures sur les surfaces de rupture statique (éprouvette disque brésilien).

## 2- CONTRAINTE THERMIQUE

### 2.1- Approche analytique

La situation la plus délicate pendant le choc thermique se situe au moment du refroidissement de la surface extérieure. Si la valeur de la conductivité thermique est faible et le coefficient de transfert thermique est élevé, le choc peut devenir critique. Le calcul de la contrainte due à un choc thermique a été trouvé par Kingery [12]:

$$\sigma = E\alpha\Delta T\psi f(\nu) \quad (4)$$

$E$  : module de Young ;

$\alpha$  : coefficient de dilatation thermique ;

$\psi$  : sévérité de choc.  $\psi = 1$  si  $\beta > 20$  ( $\beta$  est le nombre de Biot) ;

$\nu$  : caractéristique géométrique  $f(\nu)=1$  pour 1D,  $f(\nu)=1-\nu$  pour 2D et  $f(\nu)=1-2\nu$  pour 3D ;

$\Delta T$  : gradient de température dans le matériau.

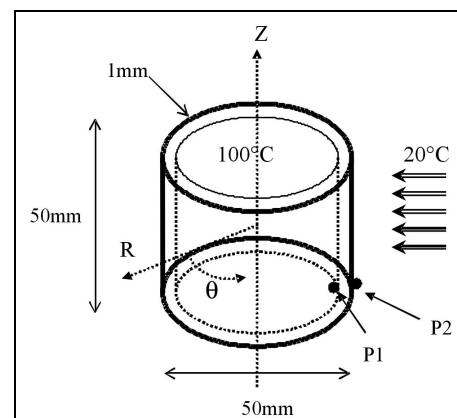
En terme de contrainte, cette approche suppose un matériau homogène, isotrope et de comportement linéaire élastique, ce qui est le cas du cristal. Bien que sa simplicité et le manque de précision soient parfois critiqués par certains auteurs, son utilisation est très fréquente dans de nombreux travaux. Le calcul de la contrainte thermique, en un point donné, nécessite d'abord la connaissance de la température en ce point.

### 2.2- Simulation numérique

Nous avons réalisé un choc thermique par simulation. Nous avons d'abord trouvé la distribution en température et ensuite introduit les résultats dans le code CASTEM2000 pour trouver les contraintes.

Nous avons adopté la méthode de simulation par éléments finis pour trouver les contraintes appliquées dans le cristal soumis à une variation thermique à l'aide d'un logiciel CASTEM2000. C'est un logiciel développé par le département de Mécanique et de Technologie du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA).

Nous avons choisi la géométrie d'un cylindre creux en raison de sa similitude avec un verre (Fig. 6). Ce cylindre creux soumis à une température initiale de 100°C est ensuite plongé brutalement dans l'eau à 20°C. Seule la surface extérieure est soumise à un changement thermique. L'intérieur du cylindre reste à 100°C. Nous avons choisi les deux points les plus sensibles.



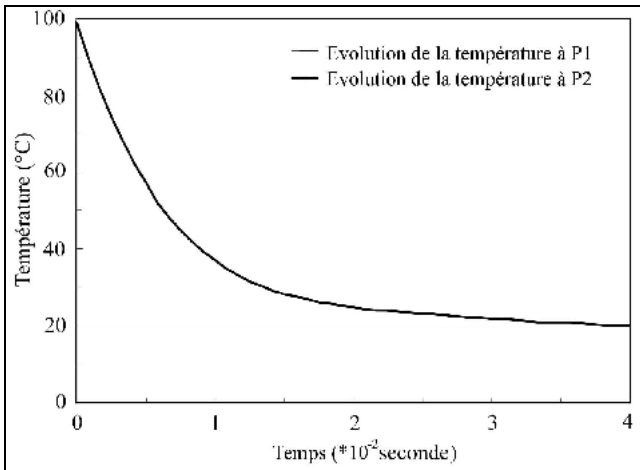
**Figure 6:** Géométrie du cylindre et deux points examinés P1 et P2.

Les propriétés thermo-physique du cristal utilisé pour le calcul sont données au tableau 4.

Mass volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité (W/m. K)	Chaleur massique (J/Kg. K)	Diffusivité (m <sup>2</sup> /s)
4350	0.8	639	0.29*10 <sup>-6</sup>

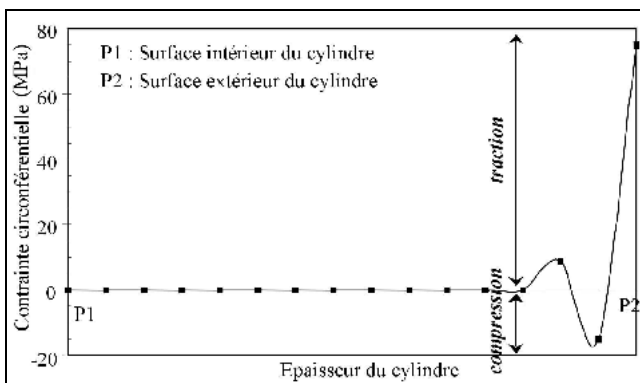
**Tableau 4:** Propriétés thermo-physiques du cristal.

La Figure 7 présente la variation de température en fonction du temps pour les points P1 et P2.



**Figure 7:** Variation en température en fonction du temps dans une éprouvette cylindrique creuse.

Selon les conditions limites imposées et la valeur du transfert thermique ( $h=20000 \text{ W/m}^2.\text{K}$ ) pour une convection forcée dans l'eau, la surface intérieure du cylindre (P1) voit sa température inchangée tandis que la surface extérieure (P2) subit un changement brutal de température qui atteint 20°C au bout de 0.2 seconde. Nous avons introduit la variation en température aux points P1 et P2 dans le code de calcul CASTEM 2000 pour évaluer la contrainte induite par ce choc thermique (Fig. 8).



**Figure 8:** Distribution de la contrainte maximale sur l'épaisseur du cylindre.

La majorité de l'épaisseur du cylindre est soumise à une compression très faible (500Pa) mais, près de la surface extérieure, on met en évidence une traction importante (75MPa) précédée d'une compression (15MPa). Nous avons

vérifié que la valeur maximale en traction est en bonne concordance avec celle calculée par la théorie de Kingery [12].

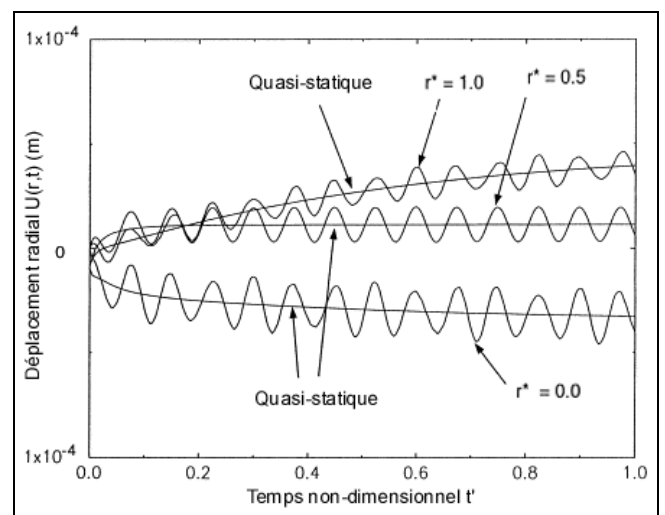
### 2.3- Onde de contrainte générée par le choc

Les ondes de contraintes dues à un choc thermique pour un cylindre creux ont été calculées par H. Cho et G.A. Kardomateas à l'aide d'une méthode analytique [13]. Ils ont résolu l'équation d'équilibre qui contient le champ thermique et l'effet d'inertie. Le déplacement en thermo-élasticité linéaire dynamique a été calculé en deux temps :

1. le déplacement de thermo-élasticité pour la partie quasi statique ;
2. le déplacement de thermo-élasticité pour la partie dynamique.

En conditions initiales, le déplacement est nul au départ et il n'y a pas de force appliquée sur les surfaces extérieures et intérieures du cylindre. Pour la partie quasi statique, le déplacement a été trouvé précédemment par Kardomateas. Ils ont adopté la transformation de Hankel et la transformation de Laplace pour résoudre l'équation différentielle non homogène de la partie dynamique.

La Figure 9 présente les résultats de leur calcul pour l'onde de déplacement radiale et pour un cylindre en verre/époxy. La température de 300°C est appliquée soudainement à l'intérieur du cylindre. La température extérieure est celle de l'air ambiant. Le transfert thermique est réalisé par convection naturelle. Les coordonnées non dimensionnelles  $r = 0, 0.5$  et  $1$  représentent respectivement l'intérieur, le centre et l'extérieur du cylindre. Il est important de remarquer que la compression est appliquée à l'intérieur du cylindre, et la traction à l'extérieur. Un deuxième point important est que les contraintes d'un choc thermique ont un effet dynamique: elles arrivent rapidement à l'état d'équilibre, tandis que les composants dynamiques de l'effet d'inertie oscillent avec une faible amplitude autour de la valeur d'équilibre, pendant un intervalle de temps assez long. Ces résultats permettent de justifier l'approche statique utilisée.



**Figure 9:** Onde du déplacement radiale à travers l'épaisseur du cylindre.

### 3- APPROCHE PROBABILISTE POUR DETERMINER LA TENEUR CRITIQUE EN OXYDE DE PLOMB EN FONCTION DU RISQUE DE RUPTURE

Compte tenu des propriétés spécifiques du cristal (sensibilité aux défauts, fragilité, effet de géométrie), il est plus réaliste d'avoir une approche probabiliste de sa rupture. C'est-à-dire que nous devons considérer les valeurs de la résistance à la rupture comme des variables aléatoires. Globalement, il y a trois approches pour décrire les critères de rupture: empirique, déterministe et probabiliste. L'analyse statistique à l'aide de la Loi de Weibull est couramment utilisée pour connaître les distributions des défauts dans les matériaux fragiles. Mais dans notre cas, nous avons utilisé la loi Normale qui donne une distribution très voisine des résultats expérimentaux.

#### 3.1- Critères de rupture

Nous pouvons aborder le problème avec deux types de critères de rupture : déterministe ou probabiliste. Selon le critère déterministe, la rupture apparaît si:

$$\sigma_{ap} > R \quad (5)$$

où  $\sigma_{ap}$  est une contrainte appliquée,  $R$  la résistance.

Pourtant, ce critère ne permet pas d'avoir une estimation correcte du risque de rupture car il n'est pas toujours possible d'avoir le nombre de données nécessaire pour obtenir la valeur minimale de la résistance pour des raisons de temps et de coût. Par contre, le critère probabiliste permet d'estimer ce risque. D'abord, nous considérons la contrainte appliquée et la résistance à la rupture obéissant à la loi de distribution Normale.

Le critère probabiliste considère deux événements dépendants. Le premier est que la probabilité de la contrainte appliquée soit supérieure à une valeur donnée  $\sigma^*$ :  $P(\sigma_{ap} > \sigma^*)$ .

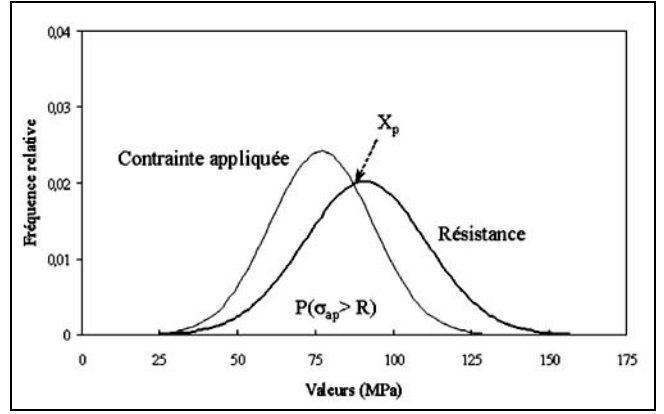
Le deuxième est que la résistance à la rupture soit inférieure à la contrainte  $\sigma^*$ :  $P(R < \sigma^*)$ .

La rupture apparaît si ces deux événements se réalisent en même temps. Ceci est représenté par l'intersection entre deux distributions Normales de deux événements (Fig. 10), c'est-à-dire :

$$P(\sigma_{ap} > R) = \left[ \frac{1}{\sigma_{ap}\sqrt{2\pi}} \int_{x_p}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x-\mu_{ap})^2}{2\sigma_{ap}^2}\right) dx \right] + \left[ \frac{1}{\sigma_r\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_p} \exp\left(-\frac{(x-\mu_r)^2}{2\sigma_r^2}\right) dx \right] \quad (6)$$

où:  $\mu_{ap}$ ,  $\sigma_{ap}$ ,  $\mu_r$  et  $\sigma_r$  représentent respectivement l'espérance et l'écart-type de la contrainte appliquée, et l'espérance et l'écart-type de la résistance à la rupture.

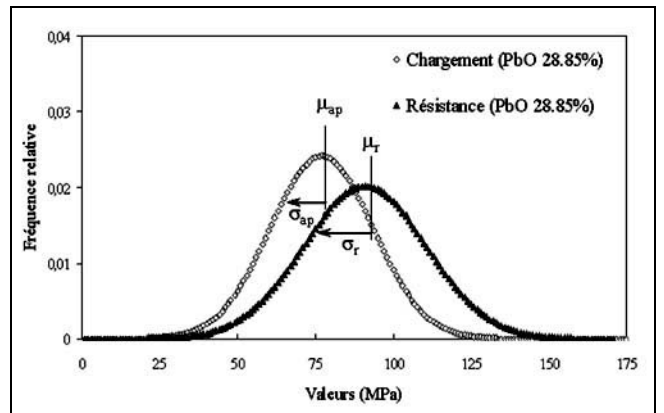
La probabilité de ces deux événements change en fonction de la teneur en oxyde de plomb. A partir des résultats obtenus expérimentalement et numériquement dans les paragraphes précédents, nous avons obtenu les variations théoriques des contraintes appliquées et des résistances à la rupture.



**Figure 10:** Distribution Normale de la contrainte appliquée et de la résistance.

#### 3.2- Distribution Normale de la résistance à la rupture et de la contrainte appliquée

La figure 11 présente la distribution normale de la résistance à la rupture à partir des résultats d'essais dynamiques et la distribution normale du chargement thermique obtenue par la simulation.



**Figure 11:** Distribution Normale : résistance à la rupture (▲) et contrainte appliquée (◇).

La valeur de l'espérance  $\mu_r$  est de 93 MPa. La valeur de l'écart-type  $\sigma_r$  est de 21 MPa. La distribution normale de la contrainte appliquée est obtenue à partir de la méthode de la simulation. Pour cela, nous posons l'hypothèse :

##### Hypothèse 1:

La valeur de la contrainte appliquée est la valeur de l'espérance  $\mu_{ap}$  ;

Le rapport entre l'espérance  $\mu_{ap}$  et l'écart-type  $\sigma_r$  est une constante  $b$  ( $b = 0.22$ ).

Cette constante est la même pour la contrainte appliquée.

La figure 11 représente la distribution Normale obtenue à partir de cette hypothèse avec comme valeurs 75 MPa pour  $\mu_r$  et 16.65 MPa pour  $\sigma_{ap}$ .

#### 3.3- Variation de la distribution normale de la résistance et de la contrainte appliquée

Maintenant, nous allons étudier la variation des

résistances à la rupture et la contrainte appliquée en fonction de la teneur en oxyde de plomb. Les valeurs de la contrainte de rupture en statique en fonction de la teneur en oxyde de plomb peuvent être obtenues théoriquement (voir équation 2). Nous posons une deuxième hypothèse pour trouver la variation des résistances à la rupture.

**Hypothèse 2:**

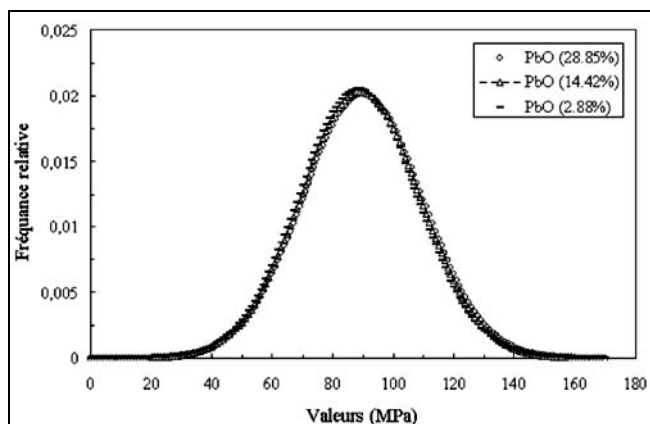
Les valeurs de la contrainte de rupture statique sont des valeurs de l'espérance  $\mu_s$  ;

Le rapport entre la valeur  $\mu_s$  et  $\mu_r$  est une constante  $a$  ( $a = 0.685$ ).

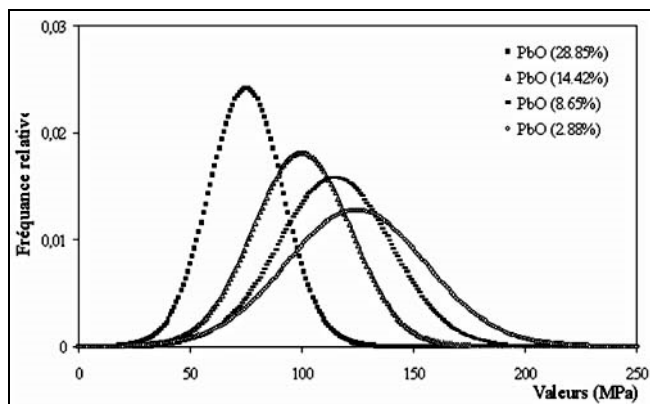
Les valeurs de  $\mu_r$  et  $\sigma_r$  en fonction de la teneur en oxyde de plomb sont obtenues à partir des constantes  $a$  et  $b$  (Fig. 12). La variation de la distribution Normale de la contrainte appliquée a été obtenue par la méthode utilisée précédemment. La variation théorique du coefficient de dilatation thermique en fonction de la teneur en oxyde de plomb a été préalablement déterminée (voir équation 2).

Ces valeurs obtenues sont introduites dans la simulation numérique en gardant les mêmes conditions établies au départ pour trouver la contrainte appliquée pour chaque teneur en oxyde de plomb.

A partir de l'hypothèse 1, nous avons pu obtenir la variation de la distribution Normale en fonction de la teneur en oxyde de plomb (Fig. 13).



**Figure 12:** Variation de la distribution Normale de la résistance en fonction de la teneur en plomb.



**Figure 13:** Variation de la distribution Normale de la contrainte appliquée en fonction de la teneur en oxyde de plomb.

**3.3- Estimation de la probabilité de rupture du cristal**

Dans le paragraphe 3.1, nous avons défini le critère probabiliste de la rupture du cristal soumis à un choc thermique :

$$P_r(\sigma_{ap} > R)$$

Nous avons obtenu la valeur de  $P_r$  en fonction de la teneur en oxyde de plomb (voir équation 5). Le tableau 5 montre le résultat du calcul.

Teneur (%)	28.85	25.96	23.08	20.2	17.31	14.42	11.54	8.65	5.77	2.88
Xp (MPa)	87.2	90	93.9	100	100.4	101.5	103.3	105.1	106	108.4
$P_r$	0.623	0.74	0.851	0.958	0.942	0.847	0.575	0.676	0.6	0.531

**Tableau 5:** Variation de  $P_r$  en fonction de la teneur en oxyde de plomb.

La valeur de  $P_r$  peut varier de 0 à 1. Si  $P_r$  atteint 1, on peut considérer que la probabilité de rupture est une certitude. D'après nos résultats,  $P_r$  atteint 0.958 pour un cristal dont on a 20.2 % de la teneur en oxyde de plomb.

**CONCLUSION**

La contrainte due à un choc thermique résulte d'un chargement dynamique :

- les propriétés du cristal dont le coefficient de dilatation et la résistance à la rupture ont un caractère dispersif,
- la probabilité de rupture du cristal devient critique pour un cristal dont la teneur en oxyde de plomb est d'environ 20 %.

**Remerciements:**

Nous tenons à remercier la société CRITT Matériaux-LNE Est et en particulier M. HEITZ, chef de projet Verres et Emaux.

**REFERENCES**

- [1]- Zarzycki J., "Les verres et l'état vitreux", Edit. Masson, (1982), pp.301-303.
- [2]- Scholze H., "Le verre, Nature, Structure et Propriétés", (1980), pp.212-215.
- [3]- Dragon A., Hild F., Rota L., "Modélisation du comportement et de la rupture des matériaux sous sollicitations dynamiques", *Mec. Ind.*, (2000), pp.521-537.
- [4]- Zanotto E.D., Peitl O., "Thermal shock properties of chemically toughened borosilicate glass", *Journal of non crystalline solids*, (1999), pp.39-49.
- [5]- Smetana W., Reicher R., "Preventing failure of soda lime cover glasses by design optimization", *Engineering failure analysis*, (2000), pp.87-99.
- [6]- Tuler R., Butcher M., "A criterion for the time dependence of dynamic fracture", *The International Journal of Fracture Mechanics*, vol.4, December (1968).
- [7]- Bouzid S., Nyongue A., Azari Z., Pluvinage G., "Fracture criterion for glass under impact loading", *International journal of impact engineering*, (2001), pp.831-845.
- [8]- Nyongue A., "Comportement à la rupture des matériaux fragiles sous sollicitation dynamiques application sur le verre", Thèse doctorat, Université de Metz (2001).

- [9]- Veer F.A., Van den Berg A., M.M.A. Van der Sluijs, "The strength of glass", ECF14, Fracture Mechanics Beyond, vol.3, (2000), pp. 503-510.
- [10]- Hiramatus Y., Oka Y., "Proceeding for second congress of Inter. Society of Rock", (1970), pp.190-206.
- [11]- Hopkinson D., "A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosive or buy the impact of bullets", *Philos. Trans. Roy. Soc. London Ser. A*, 213, (1914), pp.437-452.
- [12]- Kingery W.D., "Factors affecting thermal stress resistance of ceramic materials", *Journal of American Ceramic Society*, (1955).
- [13]- Cho H., Kardomateas G.A., "Thermal shock stresses dues to heat convection at a bounding surface in a thick orthotropic cylindrical shell", *International Journal of Solids and Structures*, (2001). □