

## CARACTERISATION ET MODELISATION THERMOMECHANIQUE DES REFRACTAIRES SILICO-ALUMINEUX FAÇONNES

*B. Amrane<sup>1,2</sup>, E. Ouedraogo<sup>3</sup>, N. Mesrati<sup>2</sup>*

1 : Université Colonel Mohand Oulhadj de Bouira

2 : Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

3 : Institut National Polytechnique de Grenoble (France) [am\\_belaid@yahoo.fr](mailto:am_belaid@yahoo.fr)

### Resume :

L'étude exposée ici porte sur la caractérisation expérimentale et la modélisation thermomécanique de briques réfractaires silico-alumineuses industrielles fabriquées à partir d'un mélange de deux kaolins Algériens : le kaolin de Tamazert et la halloysite de Djebel Debbagh. Des essais thermomécaniques de compression uni axiale ont été menés respectivement à 20, 500, 700, 800, 900, 1000 et 1200°C. Une fois le matériau caractérisé, un travail d'identification des paramètres d'un modèle d'élasticité couplé à l'endommagement a été réalisé.

**Mots clés:** Réfractaires silico-alumineux; Contraintes thermomécaniques ; Endommagement ; Essais thermomécaniques ; Viscoplasticité ; modélisation

### 1. Introduction

Les supports de cuisson des articles céramiques et les revêtements réfractaires silico-alumineux sont sollicités, en service, par des chocs thermiques cycliques inhérents au régime thermique de production et des charges mécaniques constantes ou variables liées au poids du produit enfourné et aux phénomènes de dilatation. Ces contraintes constituent la cause principale de leur détérioration.

L'étude de la nature et de l'influence des sollicitations thermomécaniques sur la durée de vie de ces matériaux permettra de définir, à terme, les meilleures conditions d'exploitation des structures industrielles à base de ce type de matériaux et d'optimiser leur durée de vie.

Des essais de caractérisation thermomécanique en compression simple sont alors réalisés sur des éprouvettes découpées sur des briques silico-alumineuses industrielles, sur toute la plage de températures de leur exploitation (20°C à 1200°C). Enfin, le comportement thermomécanique des matériaux étudiés est modélisé à l'aide d'un modèle d'élasticité couplé à l'endommagement pour les basses et hautes températures.

## 2. Résultats expérimentaux

Les courbes contrainte/déformation aux différentes températures d'essais (fig. 5), sont représentées sur la figure 1.

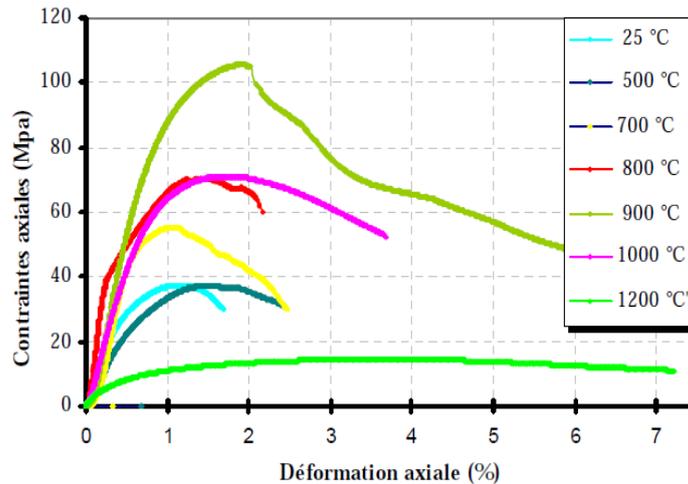


Figure 1. Synthèse des courbes de compression aux différentes températures.

## 3. Modélisation des essais

L'analyse faite des essais réalisés a permis de mettre en évidence le comportement thermomécanique des réfractaires silico-alumineux façonnés en compression uniaxiale. La loi de comportement idéale serait une loi qui décrirait un comportement élastoplastique avec endommagement aux basses et moyennes températures et un comportement viscoplastique à haute température. A température ambiante, elle devrait contenir une variable interne qui renseignerait sur l'état de dégradation ou d'endommagement du matériau.

On retrouve là toutes les lois dites en dommageables dont la loi élastique endommageable de Mazars [1].

### 3.1. Loi élasticité couplée à l'endommagement de Mazars

Le modèle de Mazars (1984) repose sur l'élasticité couplée à l'endommagement isotrope et ignore toute manifestation de plasticité, ainsi que la fermeture des fissures. Le point particulier de ce modèle est d'utiliser un critère en déformation en introduisant la notion de déformation équivalente. Celle-ci a pour expression :

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \langle \varepsilon_i \rangle_+^2} \quad , \quad \text{avec } \langle x \rangle_+ = \begin{cases} x & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x \leq 0 \end{cases}$$

La déformation équivalente prend les valeurs particulières suivantes :

En traction dans la direction  $i$ ,  $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_i$

En compression dans la direction 1,  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\gamma\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_1 < 0$  d'où  $\tilde{\varepsilon} = -\gamma\varepsilon_1\sqrt{2}$

La loi de comportement d'élasticité couplée à l'endommagement isotrope est la suivante :

$$\sigma_{ij} = (1 - D)\pi_{ijkl}\varepsilon_{kl}$$

Avec :  $\pi_{ijkl}$  : Coefficient d'élasticité du matériau non endommagé.

$$D = \alpha_T^\beta D_T + \alpha_C^\beta D_C$$

$D$ , variable d'endommagement s'identifiant en  $D_T$  dans le cas d'une sollicitation pure et à  $D_C$  en compression pure.

$D_T$  : Endommagement en traction.

$D_C$  : Endommagement en compression.

$\alpha_T^\beta$  et  $\alpha_C^\beta$  des coefficients de correction pour le cisaillement.

$\tilde{\varepsilon} \leq \varepsilon_{D0}$ , le matériau reste sain soit  $\sigma_1 = E_0\varepsilon_1$  avec  $\varepsilon_{D0}$  le seuil d'endommagement.

$\tilde{\varepsilon} > \varepsilon_{D0}$ , le matériau s'endommage soit  $\sigma_1(1 - D_C)E_0\varepsilon_1$

L'expression du seuil d'endommagement  $\varepsilon_{D0}$  est définie dans [CASTEM] :

$$\varepsilon_{D0} = \frac{-\gamma\sigma_{C0}\sqrt{2}}{E_0}$$

Le comportement des réfractaires silico-alumineux façonnés est supposé élastique jusqu'à sa limite d'élasticité  $\sigma_{C0}$  puis présentent un comportement ecrouissable jusqu'à sa résistance en compression  $\sigma_c$  qui se prolonge par une branche adoucissante. Dans le cas de la compression uni axiale, le tenseur des déformations s'exprime par :

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma\varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma\varepsilon_1 \end{pmatrix} (\varepsilon_1 < 0)$$

### 3.2. Simulation des essais de compression uniaxiale

L'objet de ce paragraphe porte sur l'étude du comportement d'endommagement des céramiques réfractaires silico-alumineuses par la méthode des éléments finis avec le code CAST3M en utilisant la loi d'endommagement de Mazars.

Une analyse générale effectuée à l'aide de la méthode des éléments finis peut se décomposer en quatre grandes étapes :

1 *Le choix de la géométrie et du maillage*

2 *Modèle : mécanique élastique isotrope endommagement*

- a. Constantes matérielles
- b. Définition des conditions aux limites
- c. Définition des sollicitations.
- d. Type d'analyse.

3 *Résolution du problème discrétisé*

- a. Calcul des matrices de rigidité et de masse de chaque élément fini.
- b. Assemblages des matrices de rigidité et de masse de la structure complète.
- c. Application des conditions aux limites.
- d. Application des chargements.
- e. Résolution du système d'équations.

4 *Analyse et post-traitement des résultats : déplacements, contraintes, déformations...etc.*

La génération du modèle d'éléments finis 2D commence par la création du modèle géométrique. Un modèle géométrique carré de 20 mm de côté a été retenu dans cette étude (fig.2). Concernant les conditions aux limites; on a procédé à un blocage horizontal du plan de symétrie (x) et (y). Ensuite un déplacement imposé de 10mm a été imposé à la face supérieure jusqu'à la rupture. Des éléments finis de type triangulaire à 3 nœuds ont été retenus pour cette étude, avec un mode de calcul : contraintes planes.

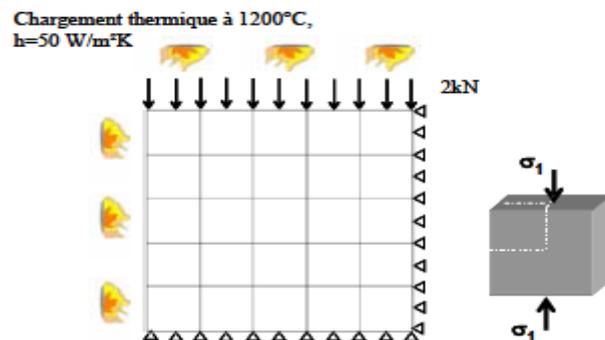


Fig. 2. Modèle géométrique

Le modèle d'endommagement de Mazars comporte six paramètres d'ajustement. Les valeurs initiales de ces coefficients ( $K_{tr01}$ ,  $A_{tr1}$ ,  $A_{com1}$ ,  $B_{tr1}$ ,  $B_{com1}$  et  $\beta_{tr1}$ ) ont été extraites d'une étude réalisée sur la modélisation des bétons réfractaires silicoalumineux à haute température [2]. Notons que le coefficient de Poisson est constant et est égal à 0,24.

Le module d'élasticité est déterminé aux différentes températures en faisant la pente des courbes contrainte/déformation.

L'identification du modèle de Mazars à haute température pour les réfractaires étudiés implique tout d'abord la détermination des paramètres d'ajustement ( $K_{tr01}$ ,  $A_{tr1}$ ,  $A_{com1}$ ,  $B_{tr1}$ ,  $B_{com1}$  et  $\beta_{tr1}$ ). Nous avons fait une étude paramétrique montrant l'effet de ces derniers en utilisant le même modèle, avec les mêmes données et en changeant à chaque fois le paramètre concerné.

Concernant les paramètres d'ajustement  $K_{tr01}$ ,  $A_{tr1}$ ,  $B_{tr1}$ , et  $\beta_{tr1}$  aucune influence n'a été remarquée. Les valeurs obtenues par l'étude citée ci-dessus ont été retenues.

La réponse du modèle en compression uniaxiale du réfractaire étudié à température ambiante est représentée par la figure 3. Le modèle de Mazars décrit correctement le comportement en compression à température ambiante.

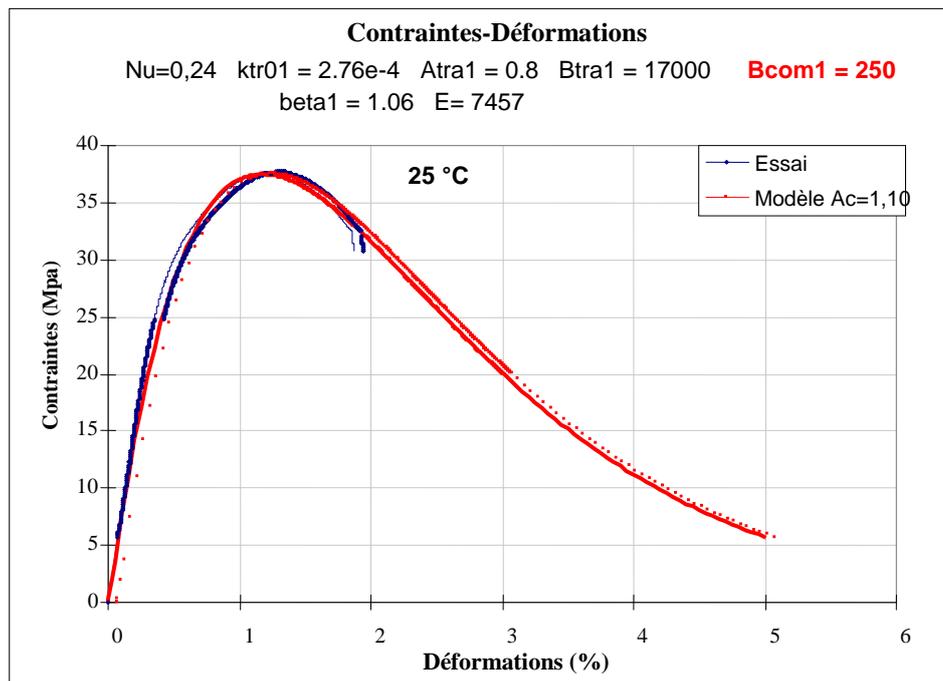


Fig.3. Modélisation du comportement en compression simple du réfractaire étudié à 25 °C par le modèle de Mazars.



Les figures 4, 5, 6, 7, 8 et 9 présentent l'ensemble des identifications effectuées à partir des essais à haute température. De façon générale, une bonne concordance est obtenue entre les résultats de l'expérience et ceux de la simulation numérique en utilisant le modèle d'endommagement de Mazars. A toutes les températures, le comportement du matériau est convenablement prédit par le modèle.

### 3.3. Evolution des paramètres du modèle de Mazars en fonction de la température

Dans cette étude on a identifié le modèle de Mazars à partir des essais de compression simple uniaxiale aux différentes températures. Cette identification a consisté à trouver les valeurs des paramètres permettant de coller au mieux aux courbes expérimentales de compression uniaxiale. Pour que l'identification soit complète il aurait fallu le faire aussi sur des courbes d'essai de traction simple aux différentes températures. Mais n'ayant pas pu faire ce type d'essais faute de moyens expérimentaux et n'ayant pas non plus trouvé de tels résultats dans la bibliographie, nous n'avons pas pu mener ce travail. Nous nous contenterons de l'identification en compression simple seulement. En admettant que la courbe d'essai de compression simple est théoriquement liée à celle en traction simple par une relation de proportionnalité, nous avons alors déterminé le rapport entre la contrainte limite élastique et la contrainte au pic dans l'essai de compression à température ambiante qui est de l'ordre de 65%. Par hypothèse, ce rapport est considéré indépendant de la température. Par une démarche qui s'apparente à l'analyse inverse, on peut maintenant identifier le seuil d'endommagement en traction à différentes températures par la relation :

$$\varepsilon_{D0}(T) = -\frac{\mu\gamma\sigma_c(T)\sqrt{2}}{E_0(T)}$$

Le tableau 1 résume les valeurs des paramètres identifiés à toutes les températures.

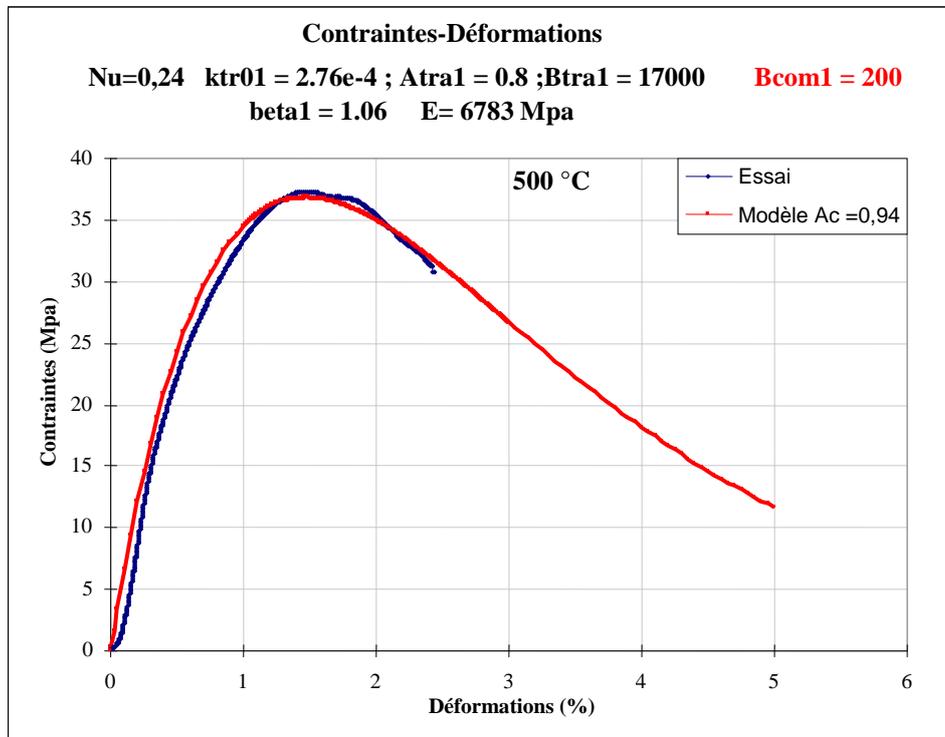


Figure 4. Modélisation du comportement en compression simple du réfractaire étudié à 500 °C par le modèle de Mazars.

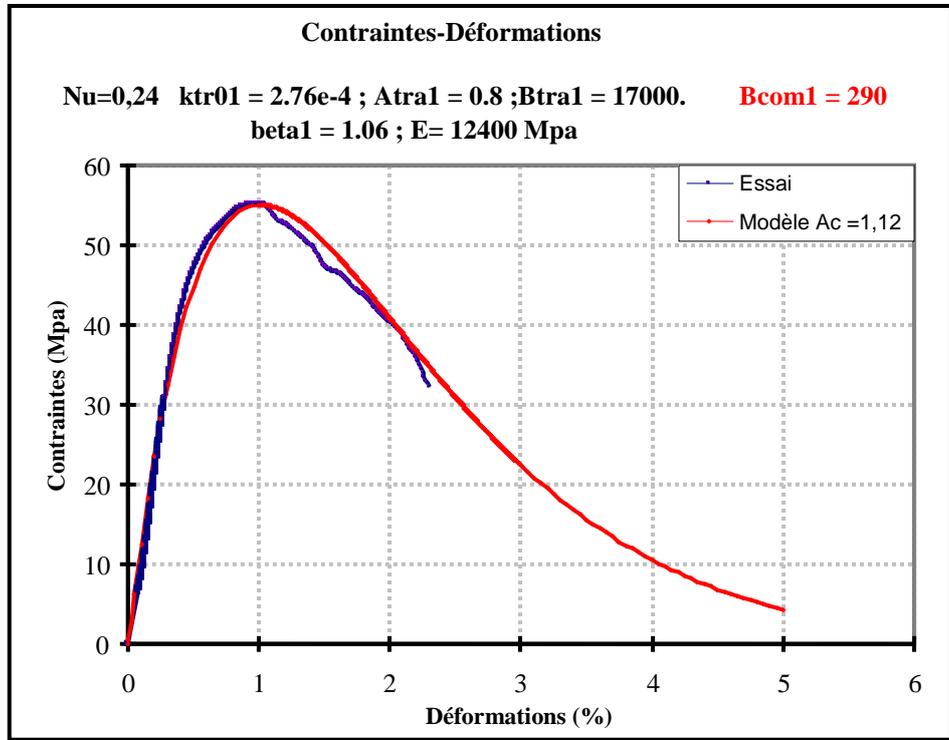


Figure 5. Modélisation du comportement en compression simple du réfractaire étudié à 700°C

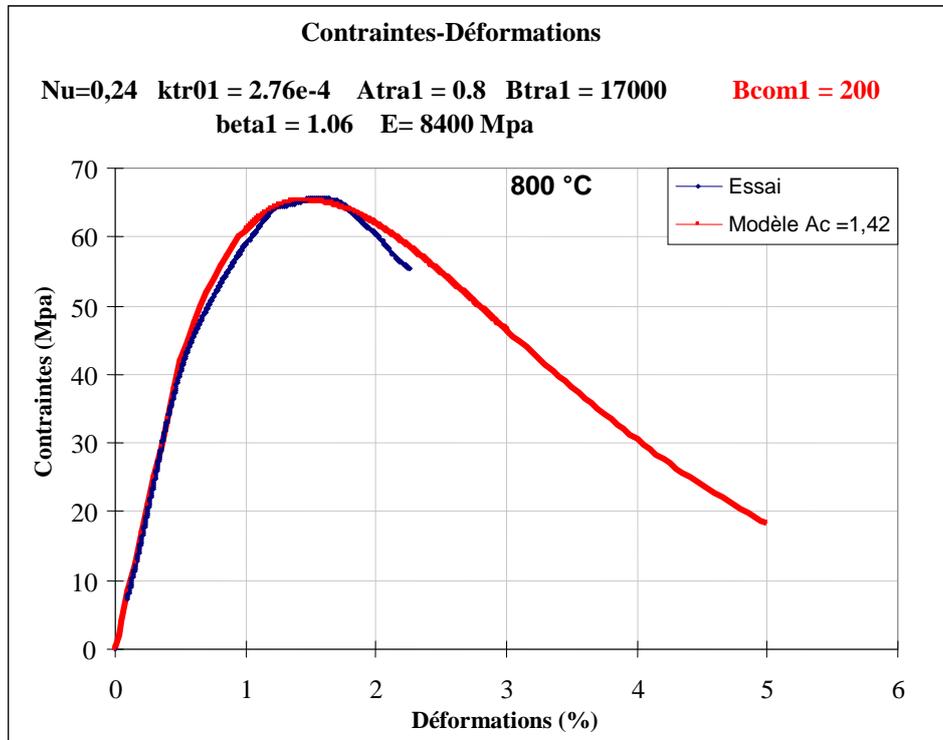


Figure 6. Modélisation du comportement en compression simple du réfractaire étudié à 800°C par le modèle de Mazars.

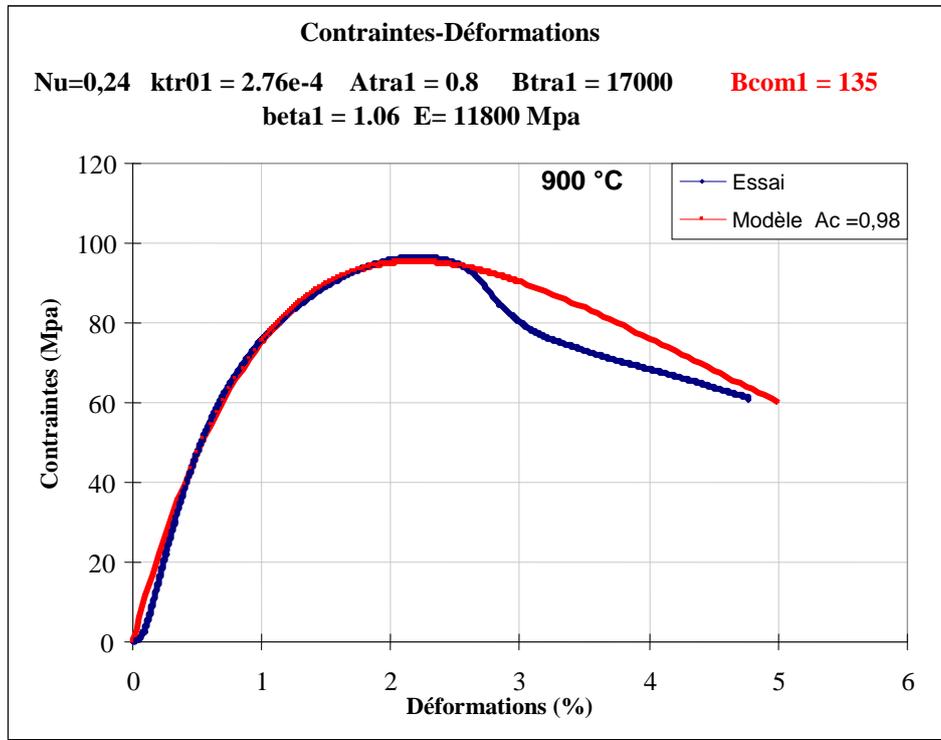


Figure 7. Modélisation du comportement en compression simple du réfractaire étudié à 900 °C par le modèle de Mazars.

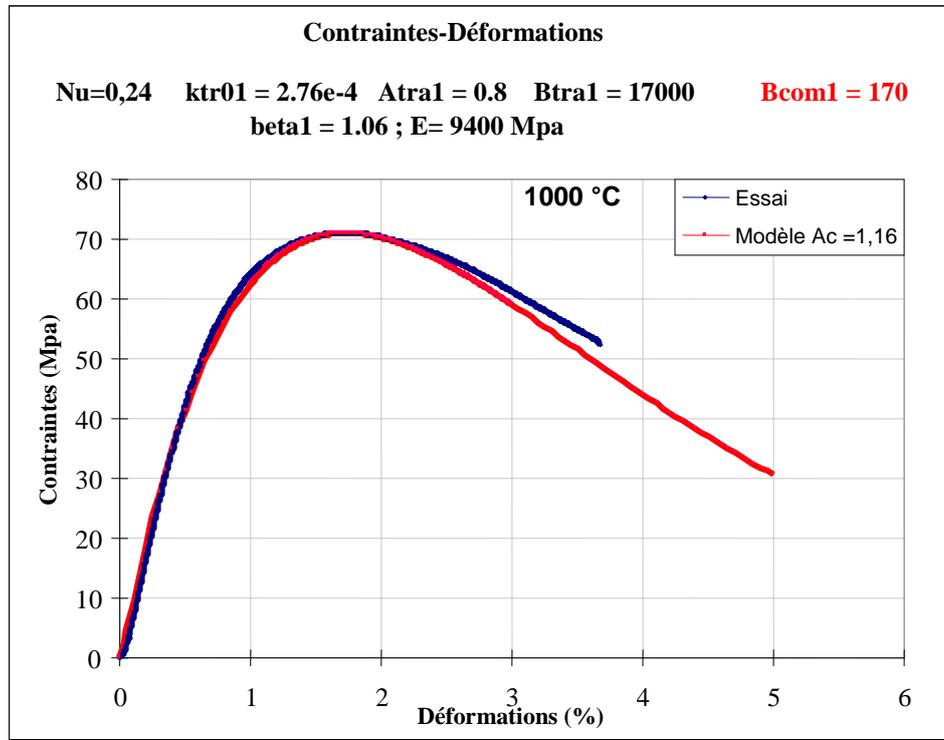


Figure 8. Modélisation du comportement en compression simple du réfractaire étudié à 1000°C par le modèle de Mazars.

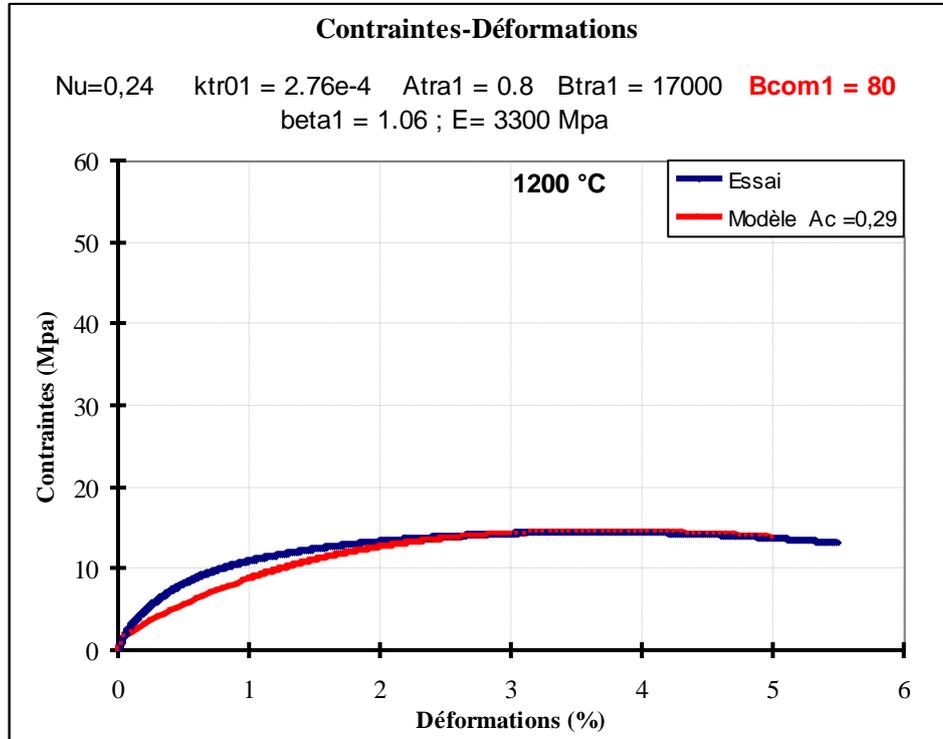


Figure 9. Modélisation du comportement en compression simple du réfractaire étudié à 1200°C par le modèle de Mazars

Tableau 1. Synthèse des paramètres du modèle de Mazars aux différentes températures.

Temp. (°C)	E (Mpa)	Nu	A <sub>T</sub>	B <sub>T</sub>	A <sub>C</sub>	B <sub>C</sub>
25	7457	0.24	0.8	17000	1.10	250
500	6783	0.24	0.8	17000	0.94	200
700	12400	0.24	0.8	17000	1.12	290
800	8400	0.24	0.8	17000	1.42	200
900	11800	0.24	0.8	17000	0.98	135
1000	9400	0.24	0.8	17000	1.16	170
1200	3300	0.24	0.8	17000	0.29	80

#### 4. Conclusion

Les résultats obtenus confirment les potentialités de la modélisation d'élasticité couplée à l'endommagement. Comme nous avons pu le constater, les simulations ont montré que le modèle de Mazars est en mesure de reproduire, du moins qualitativement, le processus d'endommagement des réfractaires silico-alumineux façonnés en fonction de la température. Nous concluons que les présentes simulations numériques ont mené à des résultats intéressants puisque les prédictions obtenues sont comparables en ordre de grandeur aux observations expérimentales. A la lumière des résultats obtenus, il semble que la loi d'élasticité couplée à l'endommagement de Mazars constitue une bonne base à améliorer pour simuler de manière plus satisfaisante, le comportement thermomécanique des céramiques réfractaire aux basses et hautes températures.

#### 5. Bibliographie

- [1] Mazars, J. 1984 Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Paris VI. 283 p.
- [2] Roosefid, M., Ouedraogo, E., Prompt, N. & Miras A. 2005a Caractérisation et modélisation du Comportement thermomécanique de bétons réfractaires silico-alumineux. *CFM2005*, Troyes.
- [3] Roosefid, M., Ouedraogo, E., Marzagui, H., Cutard, T., Prompt, N. & Deteuf, C. 2005b Thermomechanical behavior of two refractory castables. *9th Int. Tech. Conf. on Refractories (UNITECR'05)*, pp. 1003(5)-1008(5). Orlando, USA.