



HAL
open science

Caractérisation rhéologique de bétons réfractaires en traction simple et en flexion 4 points

Evariste Ouedraogo, Quoc Thanh Tran, Rudy Mague, Nicolas Prompt

► To cite this version:

Evariste Ouedraogo, Quoc Thanh Tran, Rudy Mague, Nicolas Prompt. Caractérisation rhéologique de bétons réfractaires en traction simple et en flexion 4 points. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. <hal-03362534>

HAL Id: hal-03362534

<https://hal.science/hal-03362534v1>

Submitted on 1 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Caractérisation rhéologique de bétons réfractaires en traction simple et en flexion 4 points

Evariste Ouedraogo¹, Quoc Thanh Tran¹, Rudy Mague¹, Nicolas Prompt²

¹ Laboratoire 3S, Domaine Universitaire, B.P 53, 38041 GRENOBLE

² TRB, Rue de la Neuville, 62125 NESLES

Evariste.Ouedraogo@hmg.inpg.fr

Résumé :

L'essai de traction simple sur des matériaux hétérogènes et fragiles tels que les bétons réfractaires est toujours délicat. D'infinies précautions doivent être prises afin d'obtenir des courbes représentatives du comportement du matériau. La présence de défauts, en surface ou en profondeur, détermine le comportement en traction de ces matériaux. Un dispositif expérimental conçu et réalisé au Laboratoire 3S a permis de caractériser à température ambiante un béton réfractaire silico-alumineux.

Les essais de flexion 4 points ont été réalisés sur un béton réfractaire carboné ayant subi une cuisson réductrice. Les éprouvettes de section carrée de 25 mm de côté et de 200 mm de longueur ont été équipées de jauges de déformation sur leurs faces supérieure et inférieure. Grâce à ces essais, on a pu obtenir simultanément les courbes contraintes-déformations en traction et en compression. Ils ont aussi permis de mettre en évidence le caractère non linéaire du comportement en traction avant la rupture, ce qui est moins visible sur les résultats des essais de traction simple.

Abstract :

Direct tensile tests on heterogeneous and brittle material such as refractory concrete require a lot of cautiousness in order to access a representative measurement of the material behaviour. Surface or in volume defects determine the material tensile behaviour. An experimental apparatus have been developed in Laboratory 3S and used to test at ambient temperature a silica-alumina containing refractory concrete.

Four bending points tests have been also performed on an carbon refractory concrete submitted to reducing cooking at 1500 °C. The specimen were equipped with strain gauges on their higher and lower faces and measured 200 mm in length with a 40 mm cross square section. The tests revealed simultaneous tensile and compression behaviours of the material, and specially the non linear tensile behaviour difficult to evidence with direct tensile tests.

Mots-clefs :

Béton réfractaire ; Essais de flexion 4 points ; Module d'élasticité.

1- Introduction

L'étude des matériaux réfractaires destinés à des applications à haute température est souvent focalisée sur le comportement à haute température. Ceci se justifie pleinement car la présence de la température induit des évolutions microstructurales complexes dans ces matériaux et les moyens expérimentaux à mettre en oeuvre pour caractériser ces phénomènes complexes sont lourds et doivent être assez ingénieux pour espérer obtenir une mesure représentative du comportement. Dans la famille des matériaux réfractaires, on s'intéresse en particulier à celle des bétons réfractaires ou réfractaires monolithiques. Ils sont obtenus par un mélange d'agréats en matériaux réfractaires à forte teneur en alumine, de ciment et d'eau. Les agrégats peuvent, par exemple, être à base d'andalousite ou de bauxite. Contrairement aux réfractaires façonnés (briques réfractaires) qui sont précuites avant utilisation, les bétons réfractaires subissent en général leur première cuisson à la mise en service (première chauffe)

des installations industrielles auxquelles ils sont intégrés et, par la suite, évoluent continuellement avec leur cycle thermique de fonctionnement. Ce qui justifie tout l'intérêt de la caractérisation de ces matériaux à haute température. Il n'en demeure pas moins que la connaissance du comportement de ces matériaux garde tout leur intérêt à température ambiante. D'abord la température ambiante constitue une température de référence pour suivre leur évolution thermique. Ensuite les conditions d'environnement étant clémentes, la mise en œuvre des dispositifs expérimentaux de mesure sont plus aisés. Ainsi, même les dispositifs expérimentaux développés pour les essais à haute température doivent d'abord être validés à température ambiante. Enfin, il a été montré que le comportement des bétons réfractaires pour des températures allant de 20 à 700 voir 800°C était qualitativement comparable à celui à température ambiante [Prompt 2000, Roosefid 2006]. Ceci justifie tout l'intérêt de développer des dispositifs expérimentaux à température ambiante [Simonin 2002].

Dans la présente étude on présente deux dispositifs expérimentaux de traction simple et de flexion 4 points développés au Laboratoire 3S [Tran 2003, Da Silva 2003, Mague 2004]. Par la suite on présente des résultats d'essais de traction simple effectués sur un béton réfractaire silico-alumineux et des résultats d'essais de flexion 4 points sur un béton réfractaire carboné cuit sous atmosphère réductrice à 1500°C.

2- Dispositifs de traction et de flexion 4 points

Ces différents dispositifs ont été conçus pour s'intégrer à une machine d'essais mécaniques Zwick Z400E, de type électromécanique, et dotée d'une capacité de 400 KN. Des plateaux d'adaptation sont nécessaires pour assurer. Les liaisons entre le bâti de la machine et les dispositifs présentés à la suite se font par l'intermédiaire de plateaux d'adaptation extérieurs ou intégrés au dispositif lui-même.

Le dispositif de traction simple

Ce dispositif comprend deux têtes de traction supérieure et inférieure collées à l'échantillon de béton réfractaire et deux émerillons situées entre les têtes de traction et les plateaux d'adaptation. Les têtes de traction sont des blocs cylindriques en acier inoxydable A304L collées sous charge à l'éprouvette en béton réfractaire par une colle particulièrement adaptée au collage des céramiques, l'Araldite 2011. Le choix de la colle a fait l'objet d'une longue étude et de nombreux essais qui se sont révélés concluants. L'émerillon, ensemble de deux pièces mécaniques assemblées par une liaison rotule, a pour fonction d'assurer le rotulage des têtes de traction. Enfin, pour assurer la co-axialité des têtes de traction avec l'éprouvette, un dispositif spécifique a été conçu et réalisé. Ce dispositif permet la mise en position de l'éprouvette et des têtes de traction, le collage sous chargement axial et leur maintien en position pendant la durée du collage. Ce dispositif peut recevoir toutes éprouvettes dont les extrémités s'inscrivent dans un cercle de diamètre 50 mm et pour laquelle la charge à la rupture en traction est inférieure ou égale à 10 KN. Cette limitation vient de la résistance à la traction de la colle Araldite utilisée.

Le dispositif de Flexion 4 points

Il comporte un socle inférieur supportant les deux appuis dont l'un est fixe et l'autre réglable et le mécanisme de mise en charge qui est solidaire de la traverse supérieure. L'appui mobile du socle est en liaison pivot avec ce dernier et permet une mise en place isostatique de l'éprouvette ; une vis permet de bloquer l'appui mobile dans sa position adéquate. La portée standard est de 120 mm. En défaisant la liaison pivot et en retournant cet appui mobile de 180 degrés, on peut alors augmenter la portée à 180 mm. La partie haute de mise en charge comporte deux liaisons rotules à axes orthogonaux nécessaires pour que les appuis supérieurs

viennent en contact avec la face supérieure de l'éprouvette sans précontrainte. Les liaisons pivot des deux appuis sont munies de vis de blocage en cas de besoin. Un des appuis a été conçu de façon que par retournement de 180 degrés on respecte les conditions de chargement de flexion 4 points pour la portée de 180 mm (voir précédemment).

3- Matériaux étudiés et préparation des essais

Les essais de traction et de flexion 4 points ont été réalisés sur des matériaux très différents fournis par la société TRB. Les essais de traction simple ont été réalisés sur un béton réfractaire silico-alumineux de type 54B01-FS. C'est un béton réfractaire, à base de bauxite et à ultra basse teneur en ciment, utilisé en couche de sécurité de structures industrielles de type rigole principale de haut fourneau ou utilisable en couche de durée de poche d'aciérie. Les agrégats ont une dimension maximale de 5 mm. Il est couramment utilisé jusqu'à des températures de l'ordre de 1300°C. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de partie utile cylindrique de 30 mm de diamètre. Les mesures des déformations sont effectuées à l'aide de jauges d'extensométrie de la marque Kyowa de type KFG-30-120-C1-11. La surface des éprouvettes issue du moulage étant poreuse, une procédure particulière d'enduisage préalable avec une résine est réalisée avant le collage des jauges. Les jauges sont de grande longueur afin de mesurer une valeur moyenne de la déformation représentative de la déformation globale. Les éprouvettes sont munies de deux jauges disposées symétriquement par rapport à leur axe, ce qui donne une déformation moyenne plus représentative et qui permet de mettre en évidence une flexion éventuelle de l'éprouvette.

Les essais de flexion 4 points ont été réalisés sur des éprouvettes de béton réfractaire carboné ayant subi un traitement thermique de cuisson réductrice à très haute température, 1500°C. Il s'agit d'un béton réfractaire alumineux à basse teneur en ciment auquel on a incorporé une grande quantité de carbone qui lui confère une plus grande résistance aux agressions physico-chimiques de la fonte et du laitier. En effet il est utilisé en couche d'usure de rigole principale de haut fourneau ; c'est-à-dire, la couche directement en contact avec les fluides chauds. Les éprouvettes ont une section carrée de 40 mm de côté et une longueur de 160 mm. La cuisson réductrice qu'elles ont subie a eu pour effet d'augmenter leur dureté en surface. Leur traitement à la résine GA2 préalablement au collage était particulièrement nécessaire. Elles ont donc toutes été munies de deux jauges d'extensométrie de la marque Vishay Micromesures. Les jauges de type EA-06-20CBW-120 collées sur la face supérieure mesurent les déformations de compression tandis que celles de type N2A-06-750DT-120 collées sur la face inférieure mesurent les déformations d'extension. Dans la configuration finale, un capteur de déplacement LVDT de type Sensorex permettant de mesurer en continu la flèche de l'éprouvette pendant l'essai a été incorporé au dispositif de mesure.

Désignation	Résistance en OHMS	Facteur de jauge	Sensibilité transversale	Plage de température
N2A-06-750DT-120	120 ± 0,15%	2,095 ± 0,5%	(-0,3±0,2)%	-75 à +95
EA-06-20CBW-120	120 ± 0,2%	2,085 ± 0,5%	(-1,5±0,2)%	-75 à +175

Tableau 1 : Caractéristiques des jauges à 24 °C utilisées sur les éprouvettes de flexion 4 points.

4- Résultats et discussion

Les essais de traction

La figure FIG. 1 donne une synthèse des essais effectués dans le cadre de la mise au point du dispositif. Ces résultats montrent d'abord une dispersion notable des réponses des jauges : certaines ont une réponse linéaire et d'autres non linéaire. Ce constat peut être fait

même pour des jauges homologues du même essai. La résistance à la traction connaît aussi une forte variation allant de 4 à 8,5 MPa. La mesure des modules d'élasticité en considérant les parties linéaires des courbes contrainte-déformation donne des valeurs allant de 57000 à 84000 MPa. Cette dispersion des résultats est due en grande partie à la qualité des éprouvettes de départ dont beaucoup présentaient visiblement des défauts grossiers de surface. On a pu aussi observer des phénomènes de localisation de la déformation au cours de l'essai de traction. Ceci explique la divergence qu'on peut observer dans l'évolution des réponses de deux jauges homologues ayant des réponses proches en début d'essai.

Si l'on prend en compte les résultats de tous les essais réalisés, on obtient une valeur moyenne de module d'élasticité en traction de 74,4 GPa avec un écart type de 7,6 GPa et une valeur moyenne de résistance à la rupture de 6 MPa avec un écart type de 2,7 Mpa. Si l'on ne retient que les essais pour lesquels les deux jauges donnent des valeurs de module d'élasticité avec un écart inférieur à 10% de la valeur totale, on retient alors 4 essais sur 6 et l'on obtient, pour le module d'élasticité, une moyenne de 75,1 MPa avec un écart type de 3,8 Mpa (Tableau 2). Ces valeurs sont cohérentes avec celles obtenues par les partenaires du programme Prometheref sur un dispositif de traction simple muni d'un extensomètre mécanique [Marzagui, 2005].

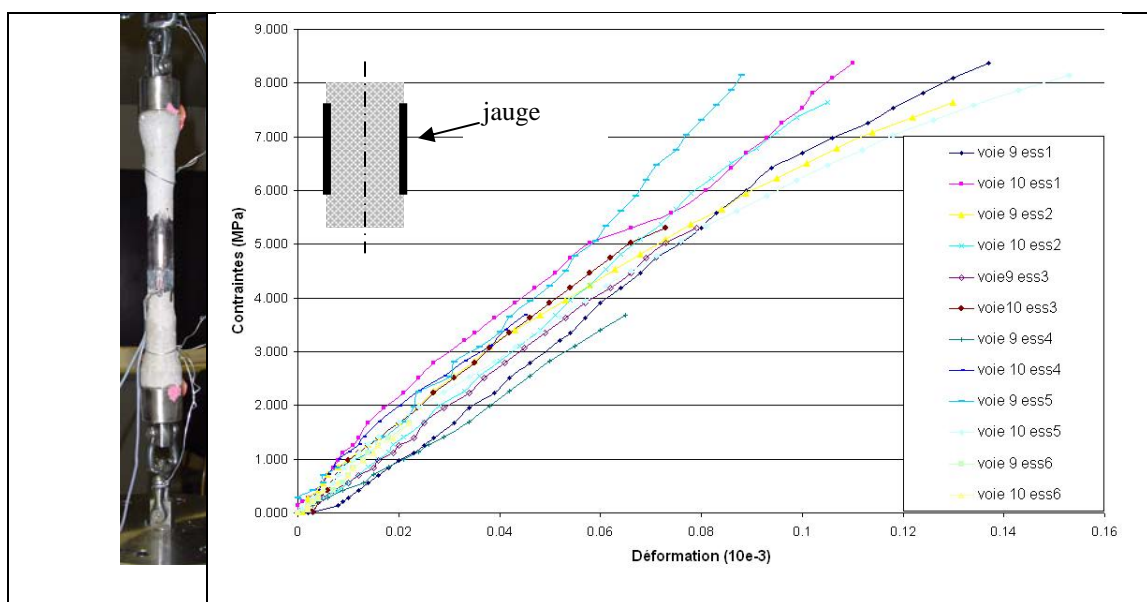


FIG. 1 - Photo de l'éprouvette en cours d'essai et résultats d'essais de mise au point du dispositif de traction sur le béton réfractaire 54B01-FS.

Essai	Module d'Young (GPa) voie 9	Module d'Young (GPa) voie 10	Contrainte à rupture (MPa)
1	71.8	79.8	8.4
2	69.8	76.2	7.6
3	70.7	76.9	5.3
4	57.0	81.3	3.7 !
5	84.4	65.7	8.1 !
6	79.4	76.7	1.7 !

Tableau 2 : Valeurs caractéristiques du béton lors des essais. Seule la partie linéaire des réponses des jauges a été considérée

Les essais de flexion

La figure FIG. 2 donne une courbe caractéristique de l'essai de flexion. La courbe de droite représente la réponse de la jauge de traction (face inférieure) alors que celle de gauche représente celle de la jauge de compression (face supérieure). A partir de ces courbes, on s'est intéressé à la détermination des caractéristiques mécaniques du matériau (voir Tableau 3). On donne pour chacun des essais les valeurs des modules d'élasticité de traction et de compression, leur rapport, la charge de rupture et la contrainte qui en est déduite en supposant un comportement élastique linéaire pour le matériau. Les modules d'élasticité ont été déterminés en effectuant une régression linéaire sur la partie linéaire du début de la courbe jusqu'à des niveaux de contrainte allant de 40% à 75% de la résistance en traction. Le tableau met en évidence le fait que le module d'élasticité de traction est en général inférieur au module d'élasticité de compression. On explique ce résultat bien connu par le fait que la sollicitation de traction a tendance à ouvrir d'emblée les fissures alors que celle de compression commence par les refermer conduisant à une plus grande rigidité pour le matériau. Le rapport des modules de compression sur traction varie sensiblement de 1,13 à 1,64. Si l'on excepte l'essai 3 qui est à part, on obtient une valeur moyenne de 64 GPa en compression et de 46 GPa en traction, soit un rapport moyen des modules d'élasticité de 1,4. Les valeurs des coefficients de régression sont affichées pour donner un paramètre d'appréciation qualitative du résultat du calcul des modules d'élasticité. Enfin, l'analyse montre que la contrainte à la rupture varie très peu d'un essai à l'autre, sa valeur moyenne étant de 4,2 MPa. Il ressort en définitive de ces essais que la cuisson a tendance à réduire le caractère fragile du comportement de ce béton réfractaire.

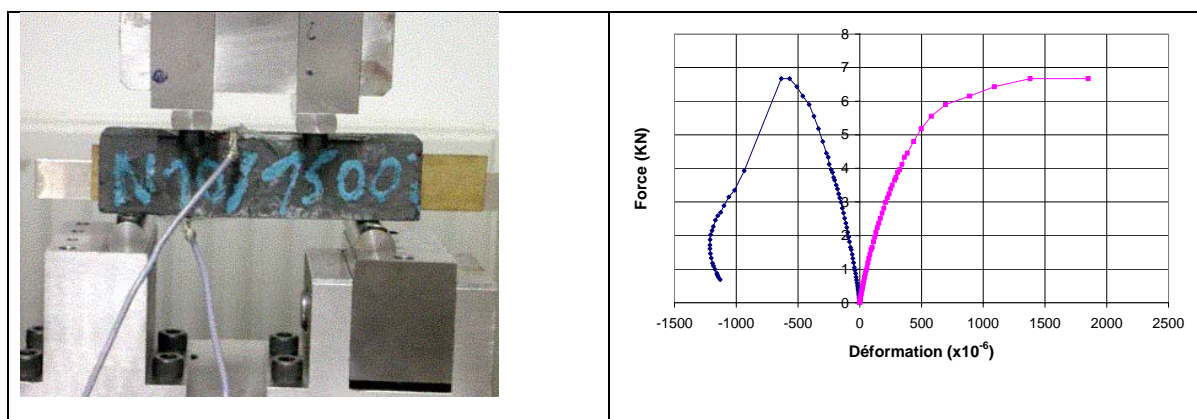


FIG. 2 - Cliché d'une vue de face du dispositif de flexion 4 points et les réponses des jauges en compression (courbe de gauche) et en traction (courbe de droite) pour un échantillon de béton réfractaire carboné cuit à 1500°C

Essai	E_C Compression (GPa)	R^2 Compression	E_T Traction (GPa)	R^2 Traction	E_C/E_T	Charge de rupture (N)	Contrainte de rupture (MPa)
1	60,3	0,9869	36,8	0,9945	1,64	2900	4,07
2	61,1	0,9983	54,3	0,9945	1,13	2880	4,05
3	85,6	0,9826	49,6	0,9178	1,44	--	--
4	70,3	9,9574	48	0,9972	1,45	3280	4,6
5	---	---	44,3	0,9907	---	2810	3,95

Tableau 3 : Caractéristiques mécaniques déterminées à partir des essais de flexion 4 points. Le paramètre R^2 est relatif au coefficient caractérisant la régression linéaire effectuée.

5- Conclusion

Les dispositifs de traction simple et de flexion 4 points ont été développés et sont opérationnels. Les procédures développées permettent d'obtenir des courbes de traction de qualité convenable et des valeurs réalistes de module d'élasticité et de résistance en traction. Dans le cas particulier du matériau étudié, des défauts bien visibles sur les éprouvettes au départ expliquent la dispersion relativement grande observée sur les résistances mécaniques obtenues.

Le dispositif de flexion 4 points permet d'obtenir des courbes de traction tout à fait exploitables dans la perspective d'une identification de loi de comportement d'endommagement. Elles permettent tout particulièrement la détermination aisée du module d'élasticité du matériau en traction et en compression. Les essais ont montré que le module d'élasticité en compression était toujours plus élevé que celui en traction. En particulier la prise en compte de l'ensemble des essais conduit à un rapport moyen entre ces deux modules pour le béton étudié de 1,4. Comme le matériau a été préalablement cuit à 1500 °C en atmosphère réductrice, on est conduit à penser que ce dernier résultat traduit l'influence de la cuisson sur le comportement du béton réfractaire. Les résultats ont enfin montré que les résistances mécaniques calculées à partir des charges de rupture mesurées au cours des essais sont très peu dispersées, ce qui conforterait la représentativité de ces mesures.

Remerciements :

Nous tenons à remercier la Société TRB pour nous avoir mis à disposition les éprouvettes qui ont fait l'objet des essais.

Références

- Prompt, N., 2000 Etude du Comportement Thermomécanique des Bétons Réfractaires alumineux : Application à une rigole de haut fourneau, *Thèse de Doctorat*, Université Joseph Fourier de Grenoble, 260 p.
- Roosefid, M., 2006 Etude du Comportement Thermomécanique de deux bétons réfractaires silico-alumineux : Applications à une poche d'aciérie, *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 272 p.
- Tran, Q.T., 2003 Thermomécanique des bétons réfractaires : conception et réalisation d'un dispositif de flexion 4 points et modélisation numérique, *Rapport de DEA MCGM*, Laboratoire 3S, Juillet 2003.
- Da Silva, T., 2003 Finalisation de dispositifs d'essais de traction et de flexion 4 points pour la caractérisation des bétons réfractaires, *Rapport de stage de deuxième année*, 15 juin au 30 septembre 2003, Laboratoire 3S - ENSHMG-INPG.
- Mague, R., 2004 Validation d'un dispositif de traction simple : caractérisation mécanique d'un béton réfractaire et modélisation numérique sur CASTEM2000, *Rapport de Master2-Recherche MCGM*, UJF-Laboratoire 3S, Septembre 2004.
- Marzagui, H., 2005 Etude de deux bétons réfractaires silico-alumineux : microstructures et comportements thermomécaniques en traction et en flexion, *Thèse de Doctorat*, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 229 p.
- Simonin, F, Olagon, C, Maximilien, S, Fantozzi, G, Room temperature quasi-brittle behaviour of an aluminous refractory concrete after firing, *Journal of the European Ceramic Society*, 22, 2002, 165-172.