

Analyse par la méthode des éléments finis du comportement en rupture du ciment de l'implant fémoral

M. Belhouari, T. Achour, B. Bachir Bouiadjra et B. Serier

Université Djilalli Liabes de Sidi Bel Abbés
LMPM
BP 98 Cité ben M'Hidi Sidi Bel Abbés 22000, Algérie
Email : belhouari@yahoo.com

Résumé :

La tenue mécanique de la prothèse totale de hanche dépend essentiellement de la nature du ciment utilisé. Le rôle principal du ciment est d'assurer une bonne adhésion implant-os et de minimiser le transfert de charge de l'implant à l'os. Sous l'effet des sollicitations mécaniques, le ciment doit pouvoir résister à l'initiation et à la propagation de fissure pouvant conduire à sa ruine et par conséquent au descellement de la prothèse. Notre travail s'inscrit dans ce contexte et a pour objectif l'analyse par la méthode des éléments finis du comportement en rupture du ciment fixant l'implant à l'os. Le champ de cette analyse s'étend sur différentes zones du ciment (proximale, médiane et distale) des côtés extérieur et intérieur du fémur. Nous montrons clairement l'effet de la position et de l'orientation de la fissure dans le ciment sur les variations du facteur d'intensité de contrainte en pointe de fissure.

Abstract :

The mechanical resistance of the total hip prosthesis depends primarily on the nature of cement used. The principal role of cement is to ensure a good adhesion implant-bone and to minimize the transfer of load toward the bone. Under the effect of the mechanical loading, cement must be able to resist the initiation and propagation of crack being able to lead to its ruin and consequently the unsealing of the prosthesis. Our work is placed in this context and aims at the analysis by the finite element method of the behaviour in rupture of cement fixing the implant at the bone. The field of this analysis extends on various zones from cement (proximal, median and distal) on the sides outside and interior of the femur. We clearly show the effect of the position of the crack and its orientation in cement on the variations of the stress intensity factor at the crack tip.

Mots-clefs :

Ciment; Fissure ; Facteur d'intensité de contrainte

1 Modèle géométrique

Le modèle géométrique de la prothèse totale de hanche ainsi que son maillage sont illustrés sur la figure 1. Le tableau 1 regroupe les propriétés mécaniques des trois éléments constituant la prothèse totale de hanche. Le comportement des trois matériaux est supposé élastique et isotrope.

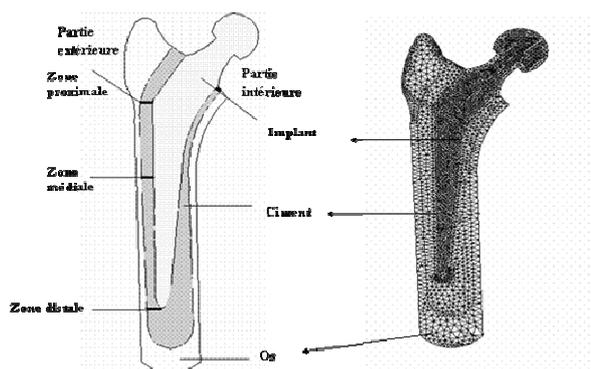


Fig. 1 – Modèle de la prothèse de hanche et son maillage.

Matériau	Module de Young E [MPa]	Coefficient de Poisson ν
Implant (Alliage de Titane Ti6Al4V)	10000	0,33
Ciment (PMMA)	2 000	0,25
Os	20 000	0,25

Tableau 1 – Propriétés mécaniques des trois constituants de la prothèse.

2 Résultats

2.1 Effet du déplacement de la fissure

Nous supposons l'existence d'une fissure de longueur $a = 2,5$ mm dans le ciment du côté extérieur du fémur. Cette fissure est déplacée verticalement de la zone distale vers la zone proximale. Les résultats ainsi obtenus sont illustrés sur les figures 2 et 3. Ces dernières montrent respectivement les variations du facteur d'intensité de contraintes des deux pointes 1 et 2 de la fissure en modes I et II, pour différentes positions dans le ciment.

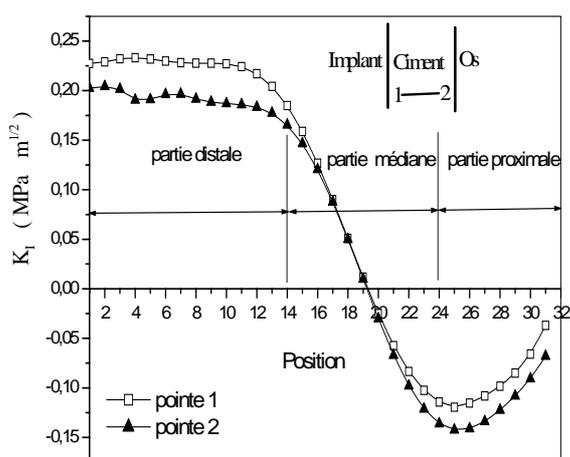


Fig. 2 – Variation du FIC en mode I.

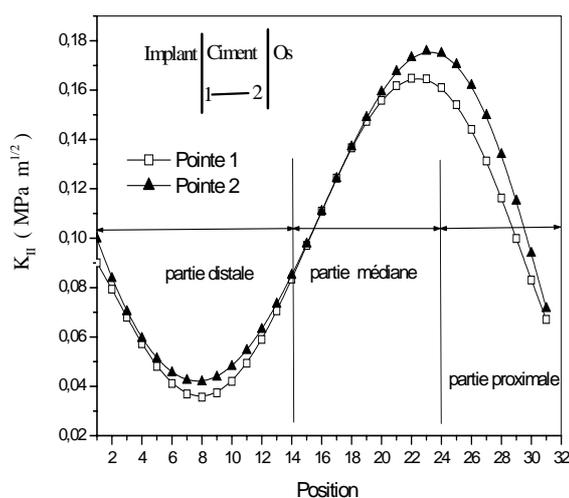


Fig. 3 – Variation du FIC en mode II.

Nous notons cependant, que le facteur d'intensité de contraintes dépend de la position du ciment fissuré. En effet, les valeurs maximales de ce facteur sont atteintes dans le ciment de la zone distale. Dans cette zone, le facteur d'intensité de contraintes est d'abord quasiment invariable puis, décroît dans la zone médiane. Une tendance de la fissure de la zone médiane vers la zone proximale conduit à des valeurs nulles du facteur d'intensité de contraintes. Dans cette dernière zone le facteur d'intensité de contraintes croît en valeur absolue lorsque la fissure se rapproche de la tête fémorale de l'os. Une telle fissure, caractérisée par un facteur d'intensité de contraintes négatif, est énergétiquement stable et ne peut se développer. Sous l'effet du changement mécanique, cette fissure a donc tendance à se refermer. Autrement dit, le ciment au niveau de la zone distale présente le risque d'endommagement de la prothèse comparativement aux deux autres zones.

Les deux pointes 1 et 2 de la fissure conduisent quasiment aux mêmes valeurs du facteur d'intensité de contraintes. La différence de facteurs d'intensité de contraintes entre les deux pointes de fissure n'est pas trop marquée. Ce même comportement est également observé en mode II (fig. 3). Nous constatons, dans un premier temps, que les valeurs les plus importantes du facteur d'intensité de contraintes sont au bas de la zone proximale proche de la zone médiane, zone où les contraintes de compression et celles de tension se compensent engendrant ainsi des contraintes de cisaillement de forte intensité Bhabri *et al* (1996), Hunga *et al.* (2004). Ces dernières sont la cause essentielle de l'accroissement du facteur d'intensité de contraintes dans cette région de la prothèse. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de cette zone, les contraintes tangentielles baissent d'intensité conduisant ainsi à une décroissance du facteur d'intensité de contraintes. Ceci montre que dans la partie délimitant la zone proximale de celle médiane, le ciment présente le risque d'endommagement par rupture brutale. Autrement dit, le ciment peut se rompre par ouverture de la fissure dans la zone distale et par cisaillement de ses lèvres dans la partie adjacente médiane-proximale.

Sur les figures 4 et 5, nous avons illustré respectivement les variations du facteur d'intensité de contraintes en modes I et II des deux pointes de la fissure, dans les 3 zones de la prothèse du côté intérieur du fémur.

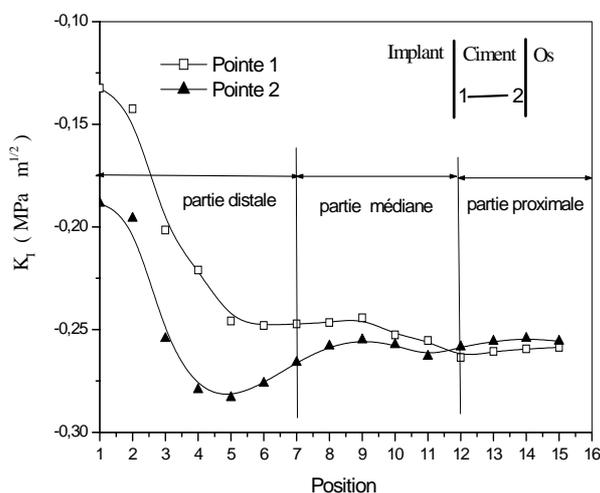


Fig. 4 – Variation du FIC en mode I.

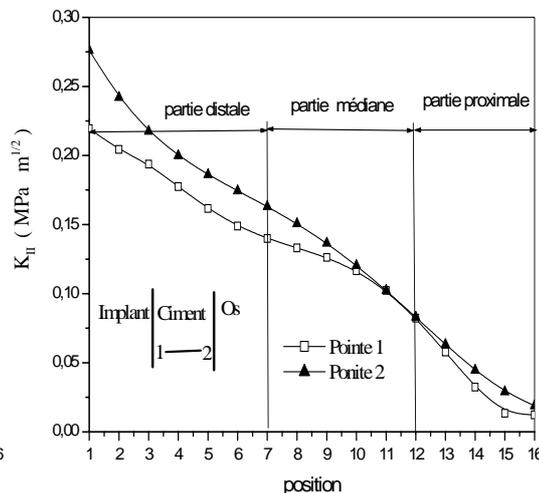


Fig. 5 – Variation du FIC en mode II.

D'après la figure 4 nous observons que quelle que soit la tête de la fissure, celle-ci conduit à un facteur d'intensité de contraintes plus significatif dans les zones proximale et médiane. Dans la zone distale le facteur d'intensité de contraintes croît en valeur absolue puis se stabilise dans les zones médiane et proximale. Ce comportement est observé pour les deux têtes de la

fissure. Les valeurs négatives du facteur d'intensité de contraintes dans les 3 parties du ciment montrent clairement que, dans la partie intérieure, le ciment est sollicité en compression. Les contraintes de compression les plus importantes sont fortement localisées dans la zone distale de la prothèse. C'est dans cette partie que le facteur d'intensité de contraintes est le plus marqué, puis il décroît en valeur absolue dans la zone médiane pour se stabiliser dans la zone proximale, Achour (2006), Achour *et al.* (2007).

En mode II, le facteur d'intensité de contraintes le plus élevé est obtenu dans la zone distale du ciment (fig. 5). Les résultats illustrés sur les figures 4 et 5 montrent, en fonction du mode de sollicitation de la prothèse, qu'une fissure initiée dans le ciment présente le risque de croître en mode II. Les valeurs négatives du facteur d'intensité de contraintes en modes I expliquent un tel comportement.

2.2 Effet de l'orientation de la fissure

L'objectif de cette analyse est de déterminer l'orientation critique de la fissure pouvant conduire à une rupture catastrophique de la prothèse. La fissure de taille $a = 2,5$ mm amorcée dans le ciment de la zone distale est orientée d'un angle θ autour de son centre.

Nous avons représenté sur les figures 6 et 7 respectivement, les variations du facteur d'intensité de contraintes en modes I et II des deux têtes de la fissure en fonction de l'angle d'orientation de celle-ci dans le ciment de la partie extérieure.

Nous remarquons qu'en mode I (fig.6), le facteur d'intensité de contraintes décroît lorsque la fissure s'oriente d'un angle de 90° . Ce facteur croît progressivement lorsque la fissure tend à être parallèle ($\theta=0^\circ$ et 180°) Achour (2006), Benbarek *et al.* (2007). Etant donné que la fissure tourne autour de son axe, les orientations correspondant aux angles 0° et 180° conduisent, par effet de symétrie aux mêmes valeurs du facteur d'intensité de contraintes. Nos résultats montrent clairement qu'une fissure orientée de 0° ou de 180° peut se propager plus facilement par ouverture comparativement aux autres orientations. Ce cas présente un risque élevé de croissance de la fissure pouvant conduire à une décohésion de l'adhérence implant-os.

En mode II (fig.7), pratiquement toutes les orientations de la fissure conduisent à des facteurs d'intensité de contraintes non nulles. Les FIC les plus significatifs en valeur absolue sont obtenus pour des orientations entre 40° et 135° . Ces orientations présentent un risque de propagation de la fissure par cisaillement conduisant ainsi à un descellement de la prothèse Achour (2006).

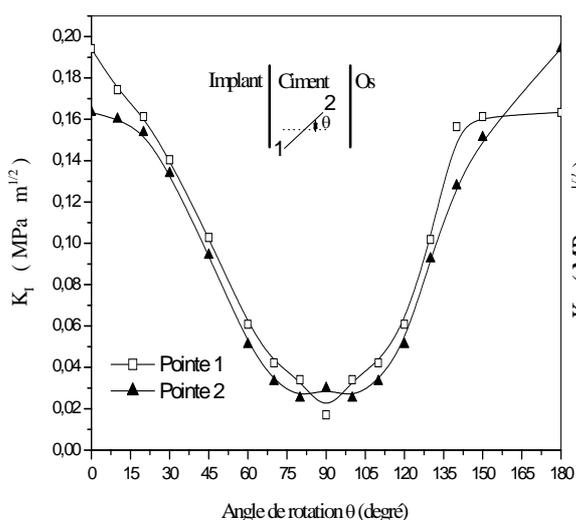


Fig. 6 – Variation de K_I en fonction de θ .

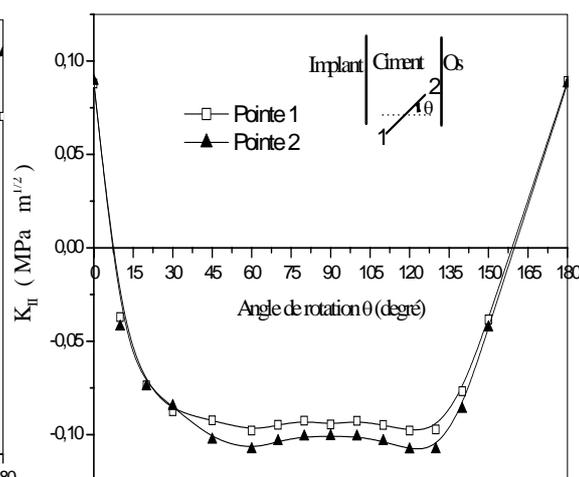
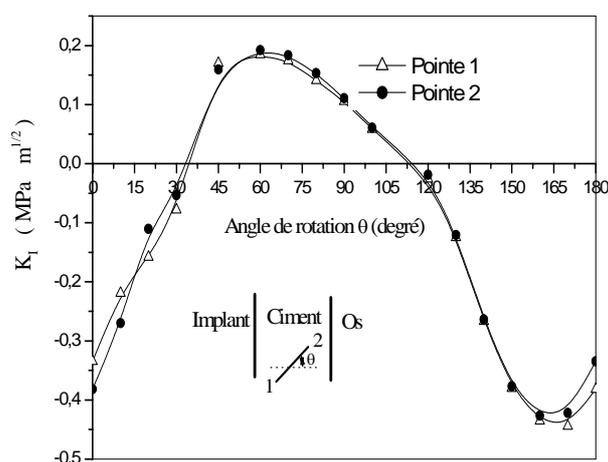
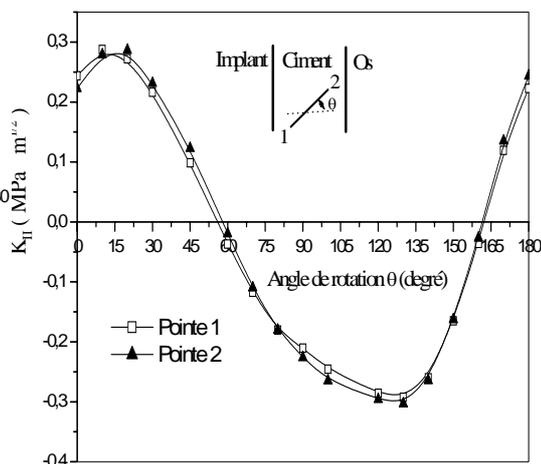


Fig. 7 – Variation de K_{II} en fonction de θ .

L'effet de l'orientation de la fissure initiée dans le ciment de la zone distale de la partie intérieure de la P.T.H est illustré sur les figures 8 et 9. Ces dernières représentent respectivement la variation du facteur d'intensité de contraintes en modes I et II des deux pointes de la fissure en fonction de son angle d'orientation. Nous remarquons que comparativement à la partie extérieure du ciment (fig.6), le comportement en rupture du ciment de la partie intérieure est totalement différent. En effet, la variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de l'angle de rotation de la fissure est quasiment périodique Achour (2006), Achour *et al.* (2007) Le facteur d'intensité de contraintes peut prendre des valeurs positives, nulles ou négatives et ce quel que soit le mode de propagation de la fissure (I ou II). Ce comportement montre qu'en fonction de l'orientation de la fissure, ses têtes peuvent être situées dans des champs de contraintes de tension ou de compression. En mode I, les valeurs négatives du facteur d'intensité de contraintes montrent que les têtes de la fissure se trouvent dans un champ de contraintes de compression et les valeurs positives dans celui des contraintes de tension (fig.8). D'après cette figure, nous constatons que l'intensité maximale du facteur d'intensité de contraintes est obtenue pour une orientation $\theta = 0^\circ$ et 180° . Ce facteur tend à s'annuler lorsque la fissure s'oriente à environ 30° et 120° . Entre ces deux orientations le facteur d'intensité de contraintes est positif, ces valeurs peuvent conduire à un risque de propagation de fissure pouvant engendrer ainsi une rupture catastrophique de la prothèse.

Fig. 8 – Variation de K_I en fonction de θ .Fig. 9 – Variation de K_{II} en fonction de θ .

En mode II (fig.9), les orientations caractérisées par des angles $\theta = 20^\circ$ et $\theta = 120^\circ$, conduisent aux valeurs les plus significatives du facteur d'intensité de contraintes. Ce facteur s'annule pour des orientations $\theta = 60^\circ$ et $\theta = 160^\circ$. D'après ces résultats, nous remarquons que d'une part, pour une orientation de la fissure de 120° celle-ci se propage essentiellement en mode II et d'autre part, pour une orientation de 60° en mode I. Ces orientations peuvent conduire à un risque de rupture brutale du ciment et donc à l'endommagement de la structure.

3 Conclusions

Le ciment est un élément fondamental pour la fixation de la cupule à l'os. Son rôle principal est d'assurer une bonne adhésion et de minimiser le transfert de charge à l'os. Les caractéristiques mécaniques du ciment sont très faibles. Sous l'effet du chargement il doit pouvoir résister à l'amorçage et à la propagation de fissure pouvant conduire à sa rupture et par conséquent à celle de toute la prothèse.

Notre étude a été conduite en vue d'analyser, par la méthode des éléments finis le comportement en rupture du ciment de scellement de l'implant fémoral à l'os. Les principaux résultats obtenus montrent que :

- Le facteur d'intensité critique de contraintes dépend de la position des fissures dans le ciment ; le signe de ce paramètre est directement lié à celui des contraintes dans la zone du ciment fissuré.

- L'amorçage d'une fissure dans le ciment de la zone distale du fémur se développe en mode I et mode II (mode mixte), contrairement à celle initiée dans la zone proximale qui ne peut se propager qu'en mode II.

- La croissance d'une fissure initiée dans le ciment de la partie intérieure du fémur ne se fait qu'en mode II. En mode I une telle fissure a tendance à se fermer.

- Une taille critique de la fissure a été mise en évidence au-delà de laquelle les critères de propagation croissent très sensiblement.

Références

Achour, T. 2006. Etude du comportement mécanique et en rupture d'une prothèse totale de hanche cimentée. Thèse de Doctorat. Université de Sidi Bel Abbés, Algérie.

Achour, T., Benbarek, S., Belhouari, M. & Bachir Bouiadjra, B., 2007 Analyse par la méthode des éléments finis du comportement en rupture du ciment de la cupule d'une P.T.H. 8^{ème} congrès de Mécanique du 17-20 Avril, El Jadida, Maroc.

Benbarek, S., Bachir Bouiadjra, B., Achour, T., Belhouari, M. & Serier, S. Finite element analysis of the behaviour of crack emanating from microvoid in cement of reconstructed acetabulum. *Materials Science and Engineering: A*. Article In Press.

Bhambri, S. K., Gilbertson, L. N. 1996 Micro mechanisms of fatigue crack initiation and propagation in bone cements. *Journal of Biomedical Materials Research* . **29**, 233-237

Hunga, J.P., Chenb, J.H., Chianga, H.L. & Shih, J. S. 2004 Computer simulation on fatigue behavior of cemented hip prostheses: a physiological model. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. **76**, 103-113

Franc 2 D, User guide, 2004 CFG Cornell university Version 3.1