



HAL
open science

Propagation de fissure sur tronçon d'os long rainuré

Théophile Kurtz, Yves Godio-Raboutet, Jean-Louis Tailhan

► **To cite this version:**

Théophile Kurtz, Yves Godio-Raboutet, Jean-Louis Tailhan. Propagation de fissure sur tronçon d'os long rainuré. 25ème Congrès Français de Mécanique, Association française de mécanique - AFM, Aug 2022, Nantes, France. 13 p. hal-04280203

HAL Id: hal-04280203

<https://hal.science/hal-04280203v1>

Submitted on 13 Nov 2023

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.

Propagation de fissure sur tronçon d'os long rainuré

T. KURTZ^a, Y. GODIO-RABOUTET^a, J.-L. TAILHAN^b

a. Aix Marseille Univ, Univ Gustave Eiffel, LBA, Marseille, France
theophile.kurtz@univ-eiffel.fr / yves.godio-raboutet@univ-eiffel.fr

b. Université Gustave Eiffel, MAST-EMGCU, Marne la Vallée, France
jean-louis.tailhan@univ-eiffel.fr

Résumé :

Un essai de propagation d'une macrofissure dans un tronçon d'os cortical humain est développé dans l'objectif de comprendre les mécanismes de rupture du tissu à cette échelle et d'identifier des propriétés de rupture, prérequis indispensables à une modélisation ultérieure. Une première campagne d'essais a été réalisée sur des segments de diaphyses fémorales entaillés soumis à une flexion trois points [1, 2]. Toutefois, l'orientation de la macrofissure est influencée par l'anisotropie du matériau. Afin d'orienter les processus de rupture dans la direction transversale uniquement, une modification de la procédure d'essai est proposée.

Inspirée de travaux bibliographiques [3, 4], les tronçons entaillés sont préalablement rainurés : une gorge hémisphérique est usinée sur la surface externe de l'os afin de guider la fissure dans la direction transversale au niveau de l'entaille. Les précautions prises pour la réalisation de l'essai de flexion trois points garantissent une maîtrise de la procédure de test malgré la variabilité géométrique des spécimens : positionnement et conditions d'appuis des échantillons, alignement des supports du capteur d'ouverture d'entaille, positionnement et hauteur de l'entaille, profondeur uniforme de la gorge. Le vérin est piloté indirectement par l'ouverture d'entaille, via un capteur de déplacement inductif. Une série de cycles de déchargements/rechargements est mise en œuvre afin de suivre les évolutions des quantités résiduelles, de l'endommagement pré-pic et de la propagation de macrofissure en post-pic.

Les résultats obtenus sont exprimés en termes de courbes d'effort en fonction de l'ouverture d'entaille. L'exploitation des cycles de charges-décharges ainsi que des ouvertures résiduelles permettent de mettre en évidence le rôle primordial de la fissuration dans les mécanismes de rupture. Les résultats montrent que l'ouverture résiduelle est directement liée au niveau d'affaiblissement structural, conséquence des processus de fissuration, et qu'aucun mécanisme de plasticité n'est visible à cette échelle. L'analyse de ces cycles permet également d'émettre une hypothèse sur le rôle de contraintes internes résiduelles sur les déformations permanentes. Les résultats montrent également que la rainure permet de guider parfaitement la macrofissure dans la direction transversale et la comparaison avec les résultats sur tronçons non-rainurés montrent bien l'impact de cette modification géométrique du spécimen. En perspective future, cet essai sera utilisé pour l'identification par analyse inverse de propriétés mécaniques dans la direction transversale.

Abstract :

A mechanical test of macrocrack propagation in a cortical bone shaft is developed to comprehend the failure mechanisms at this scale and identify fracture processes, which are paramount to a future modelisation. A first set of three-point bending tests was performed on notched segments of human femoral

dyaphysis [1, 2]. However, macrocrack orientation is influenced by the material's anisotropy. In order to drive cracking processes in the transversal direction only, a modification of the testing protocol is submitted.

From work found in the literature [3, 4], notched shafts are previously grooved : a hemispherical groove is milled on the external surface of the bone to guide the crack in the transversal direction in the notch section. Special care is taken for the three-point bending test allowing a mastered procedure despite geometric variability of specimens : positioning and boundary conditions of the samples, notch displacement sensor's supports alignment regarding bone axis, positioning and height of the notch, constant groove's depth. The hydraulic jack is driven indirectly with the notch opening, measured with an inductive displacement sensor. A series of unloading/reloading cycles are done to plot residual quantities, pre-peak damage and macrocrack propagation in post-peak.

Obtained results are expressed in terms of loading as a function of the notch opening displacement. Load-unloading cycles and residual openings analysis highlight the prominent role of cracking in failure mechanisms. Results show that the residual opening is directly linked to a structural weakening, consequently to the cracking processes, and that no plasticity is found at this scale. Cycles analysis allows us to develop a hypothesis about the role of internal residual stresses on permanent deformation. Furthermore, results point out that the groove guides the macrocrack in the transversal direction. Comparison between results on non-grooved samples exhibits the impact of the geometric feature. Future perspectives rely on the reverse analysis determination of the mechanical properties in the transversal direction.

Mots clés : Essai mécanique, Propagation de fissure, Flexion 3 points, Os cortical

1 Introduction

Le squelette est la charpente garante de l'intégrité physique du corps humain. Il est soumis à différents efforts lors de la vie quotidienne et peut se fracturer. Ce tissu biologique quasi-fragile présente une structure interne hiérarchisée et multi-échelles, ainsi qu'une forte hétérogénéité. Il est aussi caractérisé par une grande variabilité inter-sujets [5] et intra-sujet. L'étude des propriétés de rupture, notamment au travers d'essais d'initiation et de propagation de fissure dans le tissu osseux humain représente un vaste domaine d'étude au sein même de la biomécanique. Ces essais permettent d'une part d'illustrer et de comprendre les mécanismes physiques [6, 7, 8, 9, 10], et d'autre part, de déterminer des propriétés mécaniques de résistances et de ténacité [6, 11, 12, 13, 14, 15]. Ces données sont essentielles pour le développement de modèles de fissuration. Cependant, la majorité d'entre-eux sont réalisés sur des éprouvettes usinées, de géométries contrôlées et de petites dimensions, ne prenant donc pas en compte la morphologie particulière de l'os.

L'essai présenté, dont les premiers développements ont été publiés dans [2], se focalise sur l'étude de la propagation d'une macrofissure dans un tronçon d'os long humain. Travailler à cette échelle a pour avantage de ne pas nécessiter d'outillages spécifiques pour la fabrication des éprouvettes et simplifier la réalisation de celles-ci. Toutefois, les inconvénients majeurs sont : (i) le contrôle des conditions aux limites d'une éprouvette à géométrie irrégulière et (ii) le post-traitement des résultats pour la détermination des paramètres mécaniques avec la reconstitution 3D d'un modèle numérique biofidèle de l'essai.

L'essai consiste en une flexion trois points sur un tronçon d'os pré-entaille à mi-portée. Le contrôle fin de la propagation de fissure est assuré par un pilotage indirect du vérin de la presse à l'aide de la mesure de l'ouverture d'entaille. En outre, une modification de l'essai original [2] est proposée afin de maintenir transversale la propagation de la macrofissure. Pour cela, il est nécessaire de modifier le champ de contraintes selon deux choix possibles : précontraindre¹ orthoradialement l'éprouvette ou réduire localement sa section centrale. Cette deuxième solution a été choisie, car plus simple techniquement. Elle consiste en l'usinage d'une rainure hémisphérique sur le pourtour de la surface extérieure de l'os dans la section de l'entaille. En parallèle, des améliorations notables sur la reproductibilité et la répétabilité de l'essai ont également été apportées. L'interprétation des résultats obtenus a pour objectif principal de mieux comprendre les mécanismes physiques intervenant dans la rupture transversale de l'os.

2 Matériels et méthodes

2.1 Prélèvement et préservation des échantillons

Les fémurs sont prélevés sur sujets humains, post-mortem, initialement embaumés par injection d'une solution de chlorure de zinc. Les manipulations de tissus biologiques sont réalisées sous la supervision éthique de la faculté de médecine de Marseille. Les données relatives au sujet sont récapitulées dans le tableau 1.

Les tissus sont nettoyés et dégraissés à la main, en retirant les tissus conjonctifs avec de l'eau chaude, sans produits chimiques. L'os fémoral est ensuite scié dans la diaphyse afin d'obtenir un tronçon de 180 mm. Par souci de simplification, l'étude se concentre sur le tissu cortical (des travaux futurs se focaliseront sur le comportement de rupture de l'os trabéculaire). L'os trabéculaire et la moelle sont donc retirés manuellement par grattage.

Les os sont conservés dans un congélateur à une température contrôlée de -18°C. La veille d'un essai, l'éprouvette est stockée dans un réfrigérateur à 4°C. Les phases de préparation, d'instrumentation et de réglages sont réalisées à température ambiante de 20°C. Après essai, l'éprouvette brisée est conservée à nouveau à -18°C.

TABLE 1 – Références des sujets, âges, genres et latéralité. *Genre* classifié en F : Femme et H : Homme.

Sujet	Age (années)	Genre	Latéralité
150-17D	83	F	D :Droit
61-21G	82	H	G :Gauche
90-21D	70	H	D :Droit
43-20G	73	H	G :Gauche
80-21D	86	H	D :Droit

2.2 Préparation de l'échantillon

Le jour de l'essai, l'éprouvette, qui a préalablement été décongelée la veille, est mise en position sur le vérin. Afin de garantir une reproductibilité de l'essai, chaque os est testé dans la même orientation vis-à-vis de caractéristiques anatomiques communes. Le chargement est imposé sur la ligne âpre (*linea aspera*) du tronçon de fémur, au niveau de la section transversale centrale. La face antérieure de l'os est orientée vers les appuis. Cette position de l'échantillon est choisie car elle est naturellement la plus stable.

1. En compression.

A cause de la géométrie irrégulière et variable des échantillons, de petits prismes métalliques parallélépipédiques ($7\text{mm} \times 5\text{mm} \times 20\text{mm}$) sont collés avec une colle cyanoacrylate afin de diffuser localement les contraintes aux appuis et éviter un basculement de l'éprouvette. Le collage est réalisé sous la presse directement, sous un chargement de 30 N, pour garantir qu'ils restent tangent à la face antérieure de l'os. Leur positionnement et l'alignement longitudinal sont assurés par un guide imprimé en 3D muni d'un repérage par rapport à la tête de chargement. Afin d'éviter tout frottement préjudiciable aux appuis et assurer un bon fonctionnement en flexion simple de l'os, notons que l'un des prismes est conçu pour être "glissant". Il est en fait constitué de deux demi-blocs (glissants l'un par rapport à l'autre). Les surfaces en contact des deux demi-blocs sont rectifiées, polies et graissées². L'ensemble est maintenu en place par une membrane élastique. Cette dernière permet également d'assurer un retour élastique en position initiale lors du déchargement de l'éprouvette.

Une fois les appuis collés, une entaille d'épaisseur $200\ \mu\text{m}$ est usinée dans la section centrale du tronçon avec une scie à chantourner. L'os est positionné sur un charriot guidé sur le plateau de la scie. Sa position sur ce charriot est réglée à l'aide d'une pièce imprimée en 3D simulant, à l'identique, les positions des appuis de la presse et de la tête de chargement. Un étalon de $7.5\ \text{mm}$ permet de régler, sur le plateau de la scie, les butées du charriot et fixer la profondeur d'usinage de l'entaille.

Afin de guider la macrofissure dans la direction transversale, une rainure de section semi-circulaire est fraisée sur le pourtour de la surface externe au niveau de la section de l'entaille. Il est essentiel de garantir une profondeur constante de $2\ \text{mm}$. L'outil utilisé est une fraise sphérique en carbure de tungstène, Dremel 225. Un capuchon, imprimé en 3D, est vissé sur le support manuel de la fraise et la laisse dépasser légèrement. La profondeur est calibrée avec une cale étalon de $2\ \text{mm}$. La particularité du capuchon est sa forme semi-sphérique permettant de garantir constante la profondeur d'usinage sur l'os malgré la géométrie irrégulière de sa surface externe. Cette étape est réalisée sous jet d'eau afin de ne pas nécroser le tissu osseux et risquer de modifier excessivement ses propriétés.

Le capteur permettant de mesurer l'ouverture d'entaille doit être fixé sur des supports en aluminium collés sur l'os. Un nouveau guide, également imprimé en 3D, maintient ces supports capteur en position de collage et règle leur alignement par rapport aux appuis métalliques. Un point de colle cyanoacrylate est déposé sur la surface des supports. La face antérieure du tronçon d'os est alors mise en place sur le guide pour que les supports soient positionnés de part et d'autre de l'entaille et alignés avec les appuis. Cette étape essentielle permet de garantir un positionnement convenable de l'ensemble pour tous les essais.

Une fois toutes ces étapes terminées, l'éprouvette est finalement mise en position sur le vérin.

2.3 Essai mécanique

L'essai mécanique de flexion trois points est réalisé sur une presse hydraulique MTS Landmark 370.10 équipée d'un capteur de force de 15 kN. L'entraxe entre les appuis de la presse est de 155 mm. Un capteur inductif de déplacement KAMAN KD-2300, d'une plage de mesure de 0-2 mm, mesure le déplacement de l'ouverture d'entaille (Notch Opening Displacement, NOD). Ce capteur mesure la distance relative entre son support et une cible collée sur le support en vis à vis. Ces deux supports sont en aluminium afin de ne pas créer de perturbations électromagnétiques altérant la mesure. La figure 1 montre l'installation de l'essai.

Les quantités mesurées lors de l'essai sont :

2. Graisse au lithium.

- La force appliquée en N
- L'ouverture d'entaille (NOD) en mm

La procédure expérimentale reprend les étapes définies dans [2]. Elle consiste à charger l'éprouvette en son centre et à exercer durant l'essai dix cycles de décharge-recharge. Le pilotage de la charge est réalisé par l'ouverture d'entaille à une vitesse de $36 \mu m/min$, considérée quasi-statique. Les effets de la vitesse de chargement ne sont pas évalués dans cette étude et devront faire partie d'un travail à part entière. Le pas des cycles est de $200 \mu m$ de 0 jusqu'à $2 mm$ compris. Le déchargement est piloté en force afin d'atteindre $15 N$ en 5 minutes.

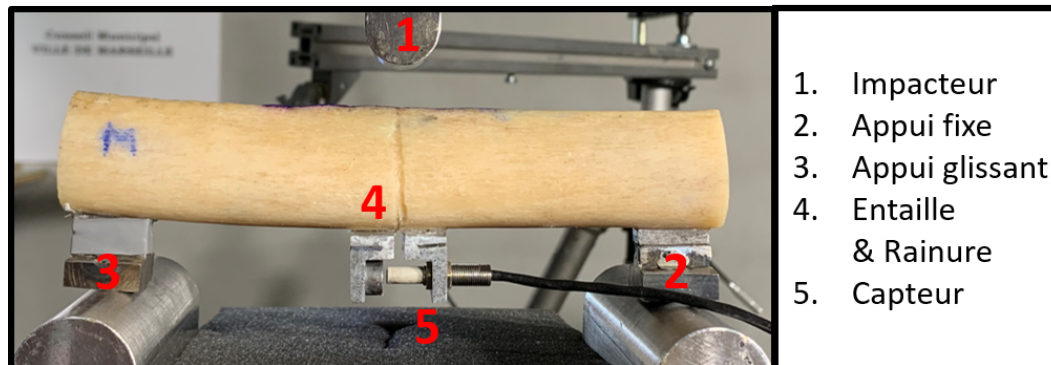


FIGURE 1 – Essai de flexion trois points à pilotage indirect par ouverture d'entaille.

2.4 Analyse des résultats

Les résultats sont traités et analysés de la même manière que dans [2] afin de comparer les essais rainurés aux essais non-rainurés. L'étude s'intéresse donc aux éléments listés ci-dessous :

- L'allure globale de la courbe,
- L'évolution de la rigidité de l'échantillon,
- L'évolution de l'ouverture d'entaille résiduelle,
- La forme des cycles imposés.

Pour la méthodologie d'analyse complète, nous invitons le lecteur à se référer à ce qui est détaillé dans [2]. Nous rappelons cependant que l'évolution des raideurs au cours du chargement peut être obtenue par une analyse des inclinaisons des différents cycles imposés lors d'un essai. Il a été choisi, et justifié dans [2], de considérer la mesure de la pente du chemin de rechargement d'un cycle pour évaluer la raideur structurelle de l'os, raideur relative au cycle considéré. L'évolution de raideur est étudiée au travers de l'évolution du coefficient d'affaiblissement (W) défini dans [2] comme l'écart relatif de raideur par rapport à la raideur initiale, et dont l'expression est rappelée ci-dessous :

$$W = 1 - \frac{K}{K_0} \quad (1)$$

Nous rappelons également que la mesure de l'ouverture d'entaille résiduelle est obtenue pour chaque cycle en extrapolant (linéairement) à 0 le chemin de déchargement du cycle considéré.

Enfin, la forme des cycles est analysée au regard de l'évolution de leurs largeurs au cours de l'essai. La largeur d'un cycle est calculée comme le quotient de son aire par l'amplitude d'effort imposé [2].

3 Résultats

Les résultats bruts obtenus sont exprimés en termes de courbes globales Force (P) en fonction de l'ouverture d'entaille (ω). Ces courbes sont données figure 2. Le tableau 2 donne les valeurs d'efforts maximums pour chaque os.

La figure 3 regroupe les faciès de fissuration finaux de chacun des essais réalisés. Les vues ont été prises à l'aide de caméras grossissantes (microscopes USB Dynolite) positionnées en face latérale et médiale des os. Il est à noter que, compte tenu de la forme quasi-cylindrique des os, le processus de fissuration se localise lors de l'essai en pointe d'entaille et se propage ensuite dans les parties latérale et médiale simultanément pour se rejoindre ensuite en direction de la ligne âpre. Même si initialement nous sommes en présence de deux fissures, latérale et médiale, nous considérons l'ensemble comme un seul et même processus de fissuration et les résultats sont analysés en ce sens.

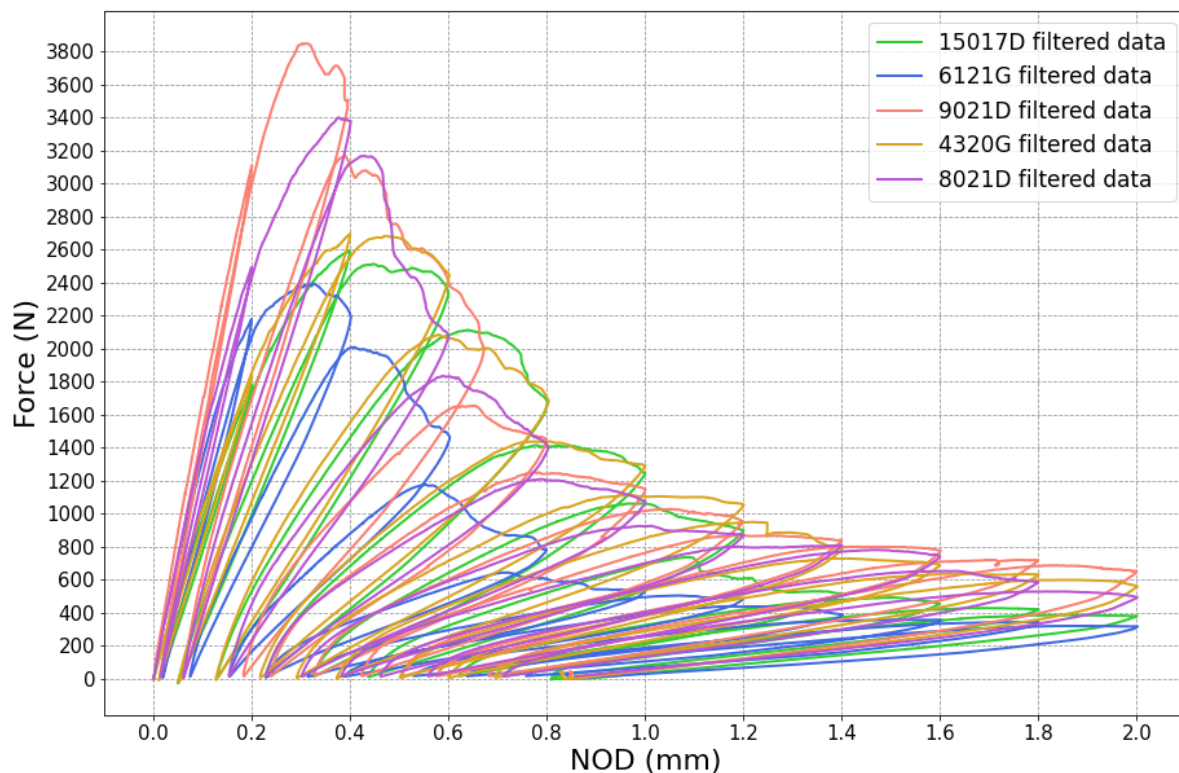


FIGURE 2 – Courbes de propagation de fissure - Force vs. NOD

TABLE 2 – Efforts maximums atteints pour chaque spécimen.

NOD=ouverture d'entaille mesurée au niveau du capteur inductif KAMAN KD 2300.

Référence	Effort max. [N]	NOD [mm]	Raideur initiale [N/mm]
150-17D	2591.2	0.40	10700
61-21G	2393.8	0.32	13127
90-21D	3848.7	0.30	17300
43-20G	2696.1	0.43	11070
80-21D	3400.6	0.37	15600

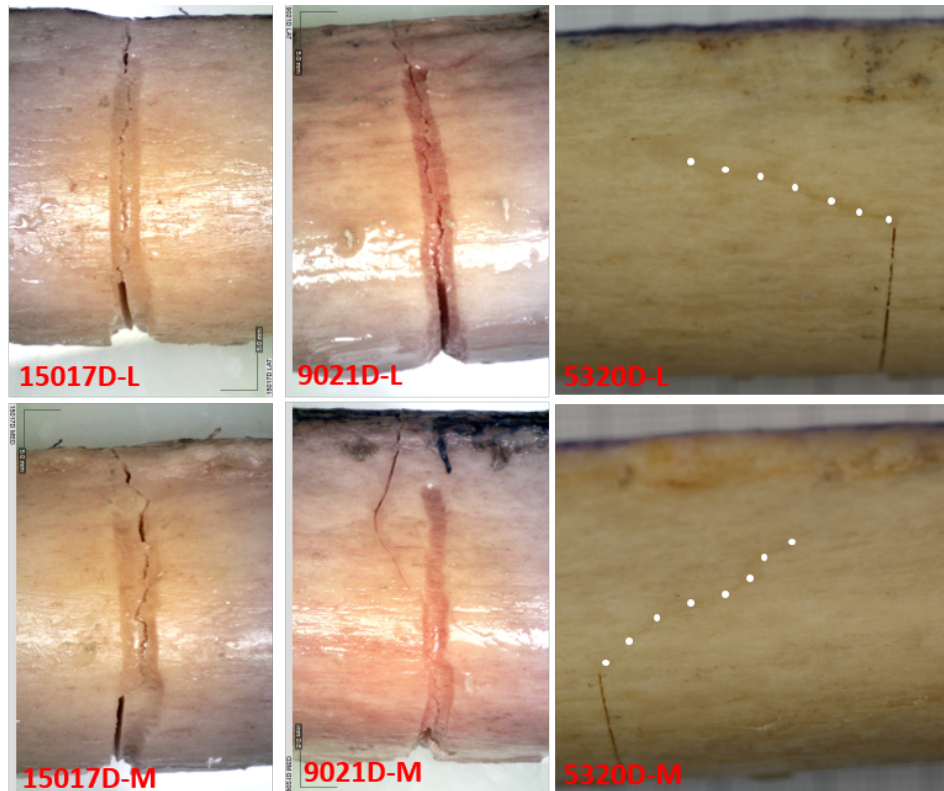


FIGURE 3 – Chemins de propagation de la fissure sur chaque spécimen. *L* et *M* correspondent respectivement à la face latérale et médiale de l'os. Les images de l'échantillon 5320 sont issues de [2].

4 Discussion

4.1 Analyse des courbes effort vs. ouverture d'entaille (NOD)

L'examen des courbes de la figure 2 permet de constater qu'elles ont toutes des formes similaires. Trois phases peuvent être distinguées :

1. Dans leurs parties pré-pic, les courbes obtenues montrent des non-linéarités évidentes. Elles restent cependant relativement faibles de 0 à 70% environ de l'effort maximal (cf. tableau 2). Puis elles s'accroissent ensuite, autour de 80 à 85% de l'effort maximal, de façon plus marquée, jusqu'au pic. Ces non-linéarités sont révélatrices de processus physiques correspondants à la formation de la Fracture Process Zone (FPZ) en pointe d'entaille [6, 11, 16, 17, 18, 4], là où se localisent les contraintes. La littérature en a abondamment détaillé les origines potentielles. Elles sont toutes liées à des phénomènes intéressants chacune des échelles de la microstructure du matériau [2]). Nous retiendrons principalement que des microfissures (de 10 à 100 μm d'ordre de grandeur) apparaissent en pointe d'entaille dans le matériau dans une zone qui grossit au fur et à mesure que progresse le chargement.
2. Aux alentours du pic de chargement, la densification et la coalescence de ces microfissures génèrent une macrofissure. A cette étape, des éléments de microstructure plus gros (porosité : canaux de Havers et Volkmann, cavité de résorption / zone interlamellaires / lignes cémentantes et structures ostéonales) entrent en jeu et influencent le chemin de propagation de la fissure [7, 18, 4, 12].

3. Dans la partie post-pic, la macrofissure localisée se propage avec sa FPZ associée. La FPZ atteint sa taille maximale dans cette phase post-pic, parfois un peu après le pic, et conserve une forme constante si elle n'est pas influencée par la proximité des conditions aux limites. Dans cette phase adoucissante, la propagation de la macrofissure se traduit par la perte progressive de capacité portante de l'os [6, 17, 18].

En conclusion, on peut considérer finalement deux régimes dans les processus de fissuration. En phase pré-pic, ces processus sont dominés par une diffusion progressive des micro-dommages (microfissuration conduisant à un endommagement du matériau) en pointe d'entaille. En post-pic, ils sont dominés par la propagation de la macrofissure et de sa FPZ associée, conduisant à un affaiblissement structurel.

Il faut noter également que la dispersion enregistrée sur les courbes globales, notamment en ce qui concerne leurs pics et leurs post-pics, est à relier à la fois aux différentes géométries des os et aux différences de microstructures internes [5, 9, 19].

4.2 Analyse des facies de fissuration

La figure 3 montrent les chemins de propagation de macrofissures, obtenus pour différents essais réalisés (rainurés et non rainurés). Le meilleur résultat sur os rainuré est le 15017D où la macrofissure reste intégralement confinée dans la rainure. Sur d'autres échantillons, la macrofissure sors de la rainure mais garde toutefois une orientation principale dans la direction verticale (cf. échantillon 9021D figure 3). Aucun mécanisme montrant l'influence de cette sortie de la gorge n'est particulièrement visible sur les courbes expérimentales figure 2. Pas de différence notable, également, entre les chemins de fissuration sur les faces latérales et médiales : la macrofissure peut sortir d'un côté comme de l'autre mais toujours en allant légèrement dans la direction distale (vers le genou). Cette tendance était déjà présente sur les os non-rainurés, où la fissure se propageait systématiquement dans ce sens. On remarque également que la sortie de la fissure, hors de la rainure, se produit toujours après un parcours entre 5 et 10 mm minimum à l'intérieur de la rainure. Dans le cas des essais non rainurés (comme l'échantillon 5320D figure 3), la bifurcation de la macrofissure se faisait quasi systématiquement au départ de l'entaille. La sortie de la macrofissure est certainement liée au fait que les gorges ne sont peut-être pas assez profondes pour concentrer suffisamment les contraintes et guider la fissure. Cependant, le choix d'une profondeur de 2 mm environ est un compromis entre une action suffisante pour le maintien de la fissure dans une orientation transversale et un faible impact sur le comportement global de l'os.

4.3 Détermination des raideurs initiales

Comme nous l'avons mentionné, les courbes globales de la figure 2 démarrent par une partie quasi-linéaire dont il est possible de calculer la pente. La mesure de cette pente donne la raideur initiale de l'os. Les valeurs obtenues pour chaque os testé sont indiquées dans le tableau 2. La raideur initiale dépend essentiellement de la microstructure et de la géométrie de chaque spécimen.

4.4 Evolution des raideurs

La figure 4 représente l'évolution du coefficient d'affaiblissement (W) en fonction de l'ouverture d'entaille imposée au cycle considéré. La valeur de W atteinte aux niveaux des différents pics des essais est égale en moyenne à 0,36. On peut également remarquer que ces courbes atteignent leur asymptote $W=1$ plus rapidement que celle de [2]. Cela est clairement lié à la présence de la rainure qui force la

propagation transversale de la fissure et favorise une réduction de section plus importante que lorsque la fissure est déviée.

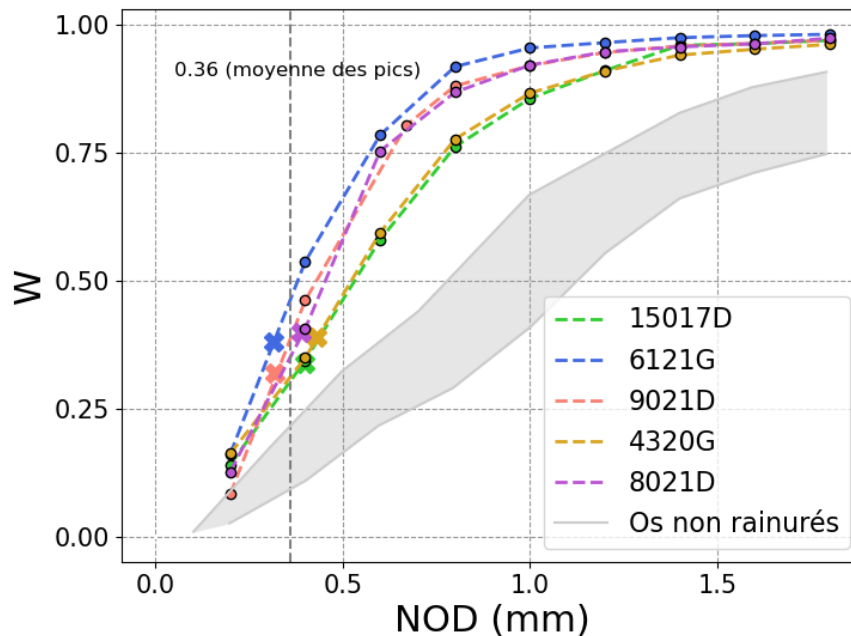


FIGURE 4 – Diminution du coefficient de rigidité (W) en fonction du cycle imposé en NOD. Les croix représentent les valeurs au pic de chargement pour chaque os. Le fuseau gris correspond à l'enveloppe globale des courbes similaires issues de [2] pour des os non-rainurés.

4.5 Evolution des ouvertures d'entaille résiduelles

L'évolution des ouvertures d'entaille résiduelles est tracée figure 5, en fonction de l'ouverture d'entaille imposée au cycle considéré. Les courbes montrent que des mécanismes de non-linéarité entraînent des déformations résiduelles après déchargement. Il faut noter qu'il a été montré dans [2] que ces phénomènes étaient visibles pour une ouverture d'entaille de 0.1 mm environ et négligeables en dessous. On remarque également, que les résultats sont relativement similaires entre les deux types d'essais (rainurés et non rainurés). Cela montre que les mécanismes induisant de la déformation naturelle sont, bien évidemment de même nature, et de même amplitude.

La figure 6 donne l'évolution de l'ouverture d'entaille résiduelle en fonction de W . De même que dans [2], l'extrapolation à l'origine des courbes indique que les ouvertures d'entaille résiduelles sont négligeables pour $W=0$. On en déduit que les processus de fissuration sont la cause principale des déformations résiduelles. Les différences observées avec les essais non rainurés sont essentiellement dues à une évolution différente de W pour les deux essais.

4.6 Forme des cycles

Les cycles de déchargement/rechargement présentent une forme caractéristique de boucle fermée. Cette forme particulière dénote l'intervention de phénomènes dissipatifs, essentiellement imputables à des blocages liés à des engrenements de fissures à des frottements entre les lèvres de la macrofissure et entre

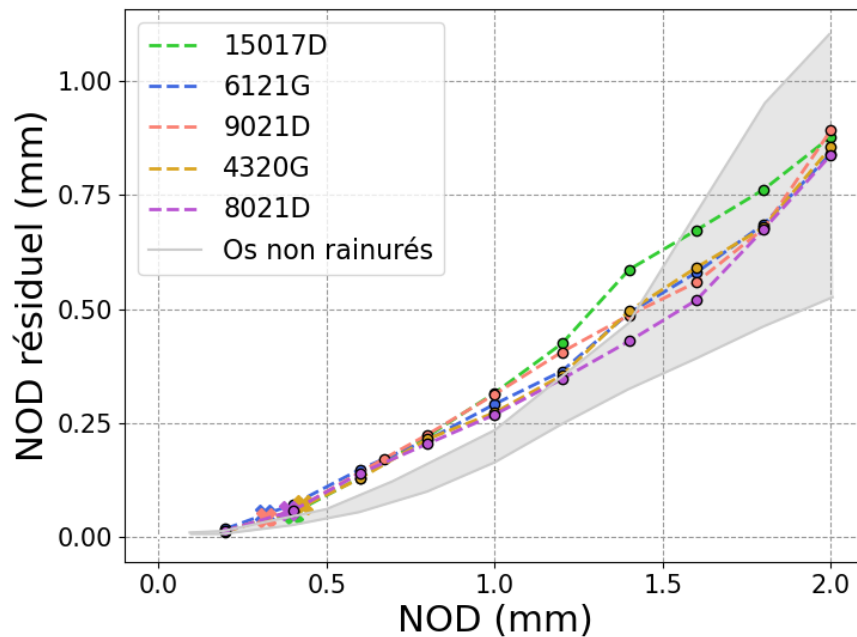


FIGURE 5 – Evolution du NOD résiduel en fonction du cycle imposé en NOD. Les croix représentent les valeurs au pic de chargement pour chaque os. Le fuseau gris correspond à l’enveloppe globale des courbes similaires issues de [2] pour des os non-rainurés.

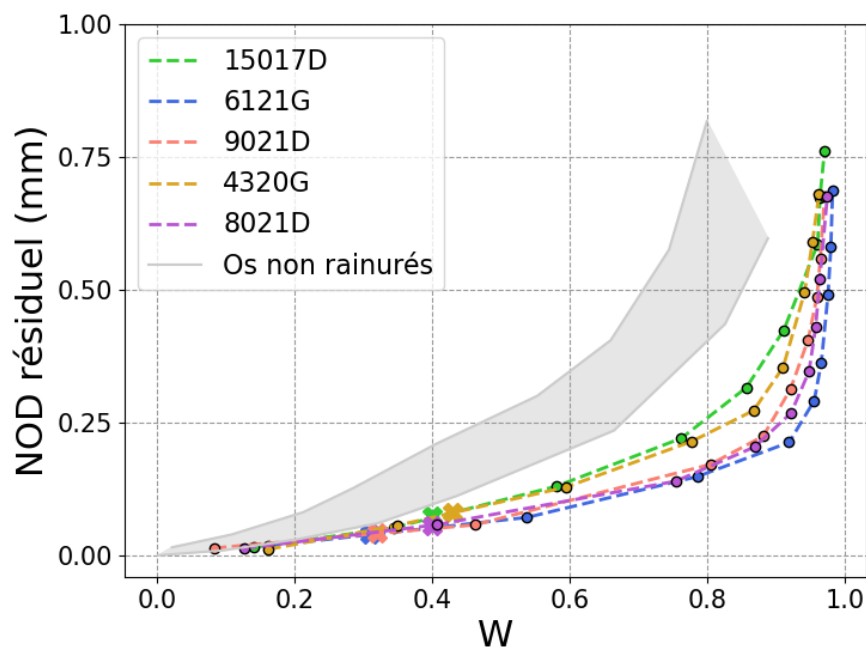


FIGURE 6 – Evolution du NOD résiduel en fonction du coefficient de rigidité (W). Les croix représentent les valeurs au pic de chargement pour chaque os. Le fuseau gris correspond à l’enveloppe globale des courbes similaires issues de [2] pour des os non-rainurés.

celles des microfissures de la FPZ [20]. On note également que le chemin de rechargement ne repasse pas par le point de déchargement qui a initié le cycle.

La figure 7 montre l'évolution de la largeur de cycle en fonction de l'ouverture d'entaille imposée au cycle considéré. On remarque que les courbes obtenues sont très proches du fuseau de celle de [2] ce qui indique des mécanismes similaires de même amplitude.

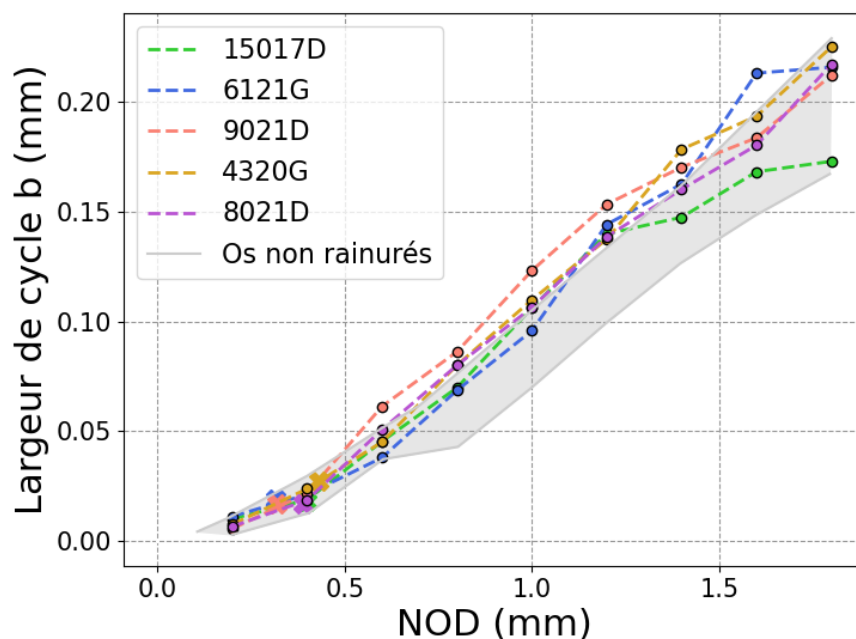


FIGURE 7 – Courbes de largeur de cycle en fonction vs. NOD. Les croix représentent les valeurs au pic de chargement pour chaque os. Le fuseau gris correspond à l'enveloppe globale des courbes similaires issues de [2] pour des os non-rainurés.

4.7 Mécanismes physiques

Des phénomènes de fissuration sont à l'origine des résultats obtenus. La fissuration induit un affaiblissement structurel progressif (W augmente, cf. figure 4) des tronçons osseux au cours de leur chargement. Ces phénomènes sont aussi à l'origine des déformations résiduelles. Car, il existe une évolution concomitante de la déformation résiduelle avec W (cf. figure 6). D'autre part, les résultats montrent qu'aucune plasticité n'est observable à cette échelle. La présence de déformation résiduelle liée à de la fissuration pourrait s'expliquer par des phénomènes de frottement/blocages. Mais ces phénomènes ne suffisent pas à eux seuls à expliquer les niveaux importants de déformations résiduelles. Un autre mécanisme (amplificateur) intervient simultanément. Nous pensons qu'il s'agit d'un phénomène de relaxation de contraintes internes lors de la création de fissures, empêchant leur complète refermeture au déchargement et expliquant une grande part de la déformation résiduelle. L'existence de contraintes internes dans le tissu osseux est parfaitement explicable par le mécanisme de remodelage osseux, et a été démontré dans la littérature [21, 22, 23]. Ce champ de contraintes interne est également très hétérogène, à l'image du matériau dans lequel il s'est développé. La libération des contraintes internes permet également d'expliquer l'amplification des phénomènes de frottements et d'engrènements qui interviennent dans la forme des cycles. Elle permet aussi d'expliquer le fait que le chemin de rechargement d'un cycle ne passe pas par le

point de déchargement qui l'a initié (par modification dans l'historique du cycle du champ de contrainte au rechargement).

5 Conclusion

Un essai mécanique de flexion trois-points sur tronçon d'os humain entaillé est utilisé pour étudier la propagation d'une macrofissure dans ce type de tissu. L'essai est adapté de sorte à imposer une propagation transversale de la fissure. La solution de guidage la plus simple choisie consiste en la réalisation d'une rainure sur la surface latérale externe de l'os. La préparation de l'éprouvette ainsi que sa mise en position sur la machine a reçu une attention particulière dans le but de garantir un protocole expérimental robuste et répétable. Des cycles de décharge/recharge montrent une diminution de la rigidité structurelle de l'os, une ouverture résiduelle de l'entaille significative et des phénomènes dissipatifs importants lors des cycles. Ces constatations sont expliquées par l'action conjointe de processus de fissuration dans un milieu hétérogène initialement soumis à des contraintes internes auto-équilibrées, conséquence du mécanisme de remodelage osseux. Lorsqu'une fissure est créée, elle libère ces contraintes, perturbant localement le champ de contraintes (hétérogène), empêchant sa complète refermeture et générant des frottements additionnels et des déformations résiduelles amplifiées. L'ensemble des résultats obtenus, sous formes de faisceaux de courbes relativement resserrées, montrent que la solution de guidage transversal de la macrofissure, même si elle n'est pas parfaite, reste très satisfaisante.

Notons également que ces essais seront ultérieurement utilisés pour la détermination, par analyse inverse, de propriétés mécaniques de rupture dans la direction transversale.

Références

- [1] Y. Godio-Raboutet, T. Kurtz, C. Boulay, J.-L. Tailhan, Crack propagation experiment on long human bone, *Computer Methods In Biomechanics And Biomedical Engineering*, 24 (2021) 306–307.
- [2] J.-L. Tailhan, T. Kurtz, Y. Godio-Raboutet, P. Rossi, L. Thollon, Macrocrack propagation in a notched shaft segment of human long bone : Experimental results and mechanical aspects, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 128 (avr. 2022) 105132.
- [3] J. C. Behiri, W. Bonfield, Orientation dependence of the fracture mechanics of cortical bone, *Journal of Biomechanics*, 22.8 (jan. 1989) 863-872.
- [4] T. Willett, D. Josey, R.X.Z Lu, G. Minhas, J. Montesano, The micro-damage process zone during transverse cortical bone fracture : No ears at crack growth initiation, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 74 (oct. 2017) 371-382.
- [5] J.-Y. Rho, L. Kuhn-Spearing, P. Zioupos, Mechanical properties and the hierarchical structure of bone, *Medical Engineering & Physics*, 20 (1998) 92–102.
- [6] J.C. Behiri, W. Bonfield, Fracture mechanics of bone — The effects of density, specimen thickness and crack velocity on longitudinal fracture, *Journal of Biomechanics*, 17.1 (1984) 25-34.
- [7] P. Zioupos, J.D. Currey, The extent of microcracking and the morphology of microcracks in damaged bone, *Journal of Materials Science*, 29.4 (1994) 978-986.
- [8] R.K. Nalla, J.J. Kruzic, R.O. Ritchie, On the origin of the toughness of mineralized tissue : micro-cracking or crack bridging ?, *Bone*, 34 (2004) 790 – 798.

- [9] M. Granke, A.J. Makowski, S. Uppuganti, J.S. Nyman, Prevalent role of porosity and osteonal area over mineralization heterogeneity in the fracture toughness of human cortical bone, *Journal of Biomechanics*, 49.13 (2016) 2748-2755.
- [10] J.B. Phelps, G.B. Hubbard, X. Wang, C.M. Agrawal, Microstructural heterogeneity and the fracture toughness of bone, *Journal of Biomedical Materials Research*, 51.4 (sept. 2000).
- [11] D. Vashishth, J.C. Behiri, W. Bonfield, Crack growth resistance in cortical bone : Concept of microcrack toughening, *Journal of Biomechanics*, 30.8 (1997) 763-769.
- [12] Simin Li, Adel Abdel-Wahab et Vadim V. Silberschmidt, Analysis of fracture processes in cortical bone tissue, *Engineering Fracture Mechanics*, 110 (2013) 448-458.
- [13] P. Zioupos, U. Hansen et J.D. Currey, Microcracking damage and the fracture process in relation to strain rate in human cortical bone tensile failure, *Journal of Biomechanics*, 41.14 (2008) 2932-2939.
- [14] E. Giner, R. Belda, C. Arango, A. Vercher-Martínez, J.E. Tarancón, F. Javier Fuenmayor, Calculation of the critical energy release rate G_c of the cement line in cortical bone combining experimental tests and finite element models, *Engineering Fracture Mechanics*, 184 (oct. 2017) 168-182.
- [15] J.J.L. Morais, M.F.S.F. de Moura, F.A.M. Pereira, J. Xavier, N. Dourado, M.I.R. Dias, J.M.T. Azevedo, The double cantilever beam test applied to mode I fracture characterization of cortical bone tissue, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 3.6 (août 2010) 446-453.
- [16] K. Piekarski, Fracture of bone, *Journal of applied physics*, 41.1 (1970) 215-223.
- [17] W. Bonfield, Advances in the fracture mechanics of cortical bone, *Journal of Biomechanics*, 20.11-12 (1987) 1071-1081.
- [18] G.P. Parsamian, T.L. Norman, Diffuse damage accumulation in the fracture process zone of human cortical bone specimens and its influence on fracture toughness, *Journal of Materials Science : Materials in Medicine*, 12 (2001) 779-783.
- [19] R.B. Martin, D.B. Burr, N.A. Sharkey, D.P. Fyhrie, *Fatigue and Fracture Resistance of Bone*, *Skeletal Tissue Mechanics*, Springer, (2015) 423-482.
- [20] P. Acker, C. Boulay, P. Rossi, On the importance of initial stresses in concrete and of the resulting mechanical effects, *Cement and Concrete Research*, 17.5 (1987) 755-764.
- [21] M. Tanaka, T. Adachi, Y. Tomita, Bone remodeling considering residual stress : preliminary experimental observation and theoretical model development, *WIT Transactions on Biomedicine and Health*, 1 (1970).
- [22] S. Tadano, T. Okoshi, Residual stress in bone structure and tissue of rabbit's tibiofibula, *Biomedical Materials and Engineering*, 16.1 (2006) 11-21.
- [23] D.J. Hadjidakis, I.I. Androulakis, Bone Remodeling, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1092.1 (2006) 385-396.