

Etude comparative analytique et numérique de l'endommagement d'un film composite à base d'amidon de manioc renforcé de fibres de coco

[Analytical and numerical comparative study of the damage of a composite film based on cassava starch reinforced with coconut fibers]

Doumbia Ahmed¹, Séri Séri Chardin², and Traoré Seydou²

¹Département Sciences de la Terre, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire

²Département de Physique, Systèmes Electroniques et Télécommunications, UFR des Sciences des structures des Matériaux et Technologies, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: We have developed a composite material based on cassava starch reinforced with coconut mesocarp fibers which has given convincing mechanical, physical and chemical properties. The objective of this work is to analyze its elastic damageable behavior. For this, we made an analytical study followed by simulations with finite element method under the Cast3M calculation code. It appears that before displacements in the vicinity of 0.51 mm, the composite, although presenting cracks, does not reach a state of total rupture. In addition, local fractures are observed from 0.52 mm in displacement. The comparison of the two methods shows a very high agreement of the values obtained. This thus confirms the results on the behavior of this material in our previous work. This composite can be used in certain areas such as packaging.

KEYWORDS: Starch, cassava, coconut, fibers, cracks, elastic, damage.

RESUME: Nous avons développé un matériau composite à base d'amidon de manioc renforcé de fibres de mésocarpe de coco qui présente des propriétés mécaniques, physiques et chimiques probantes. L'objectif de ce travail est d'analyser son comportement élastique endommageable. Pour cela, nous avons réalisé une étude analytique suivie de simulations par la méthode des éléments finis sous le code de calcul Cast3M. Il apparaît qu'avant des déplacements de l'ordre de 0,51 mm, le composite, bien que présentant des fissures, n'atteint pas un état de rupture totale. De plus, des fractures locales sont observées à partir de 0,52 mm de déplacement. La comparaison des deux méthodes montre une très forte concordance des valeurs obtenues. Cela confirme ainsi les résultats sur le comportement de ce matériau dans nos travaux précédents. Ce composite peut être utilisé dans certains domaines comme celui de l'emballage.

MOTS-CLEFS: Amidon, manioc, noix de coco, fibres, fissures, élastiques, dommages.

1 INTRODUCTION

Les matériaux, au cours de leur cycle de vie depuis leur élaboration, sont sujets à des anomalies qui conduisent à leur dégradation. En l'absence de fissures ou plus précisément si leur comportement est conforme à celui des matériaux élaborés dans les meilleures conditions possibles, ils seront considérés comme sains. Dans le cas contraire, on parle d'état endommagé. L'analyse de l'endommagement porte sur l'évolution de la dégradation depuis l'état initial jusqu'à l'apparition d'un état caractérisé par la présence de fissures de tailles représentatives par rapport au volume du matériau. Le plus souvent, ce terme

d'endommagement est associé aux propriétés mécaniques et plus particulièrement à la détérioration du module d'Young par création de cavités ou de discontinuités [1]. Le but de cette étude est d'analyser les dommages d'un composite à base d'amidon de manioc renforcé de fibres de mésocarpe de coco développé au cours de nos travaux précédents [2], [3]. Pour ce faire, dans un premier temps, le dommage D est déterminé analytiquement. La deuxième phase a consisté à réaliser des calculs par simulations par éléments finis sous le code de calcul Cast3M. Une comparaison est ensuite effectuée entre les deux méthodes. Il apparaît que le composite est de plus en plus endommagé à mesure que le déplacement augmente. Dans les deux cas, les endommagements sont quasiment nuls jusqu'à environ 0,2 mm. Il existe des microfissures comprises entre 0,3 mm et 0,51 mm. A partir de 0,52 mm, des fractures locales apparaissent. Enfin, la densité du maillage des éléments finis apporte plus de précision sur la dispersion des dommages du matériau.

2 HYPOTHESES GENERALES DE L'ETUDE

Le composite élaboré est un film dont la photo d'un échantillon est présentée sur la Fig. 1.



Fig. 1. Film composite à base d'amidon de manioc renforcé de fibres de coco [2]

Au vu des résultats de nos travaux précédents [2], nous retenons les hypothèses générales suivantes:

- Le matériau a un comportement élastique dommageable isotrope
- Il n'y a aucune manifestation de plasticité et de viscosité
- Le temps de charge est court
- La contrainte principale est unidirectionnelle

3 ETUDE ANALYTIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT

3.1 ELEMENTS DE THEORIE

L'analyse du comportement élastique d'un matériau depuis son chargement jusqu'à son état endommagé révèle l'apparition de deux états successifs différents: une phase presque linéaire et une autre où le module d'élasticité chute considérablement. Dans le premier cas, les dégâts sont pratiquement inexistant; tandis qu'au deuxième stade, des microfissures se développent brutalement [4], [5], [6]. Les différentes surfaces sont présentées à la Fig. 2.

Les contraintes (en MPa) dans le matériau sain et dans le matériau endommagé sont respectivement:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{\bar{S}} \quad (2)$$

Avec S : air de la surface saine (m^2); \bar{S} : air effective de la surface endommagée (m^2) et F : force appliquée à la surface (N).

Si S_f est la surface totale des fissures, le paramètre d'endommagement est défini par:

$$D = \frac{S_f}{S} \quad (3)$$

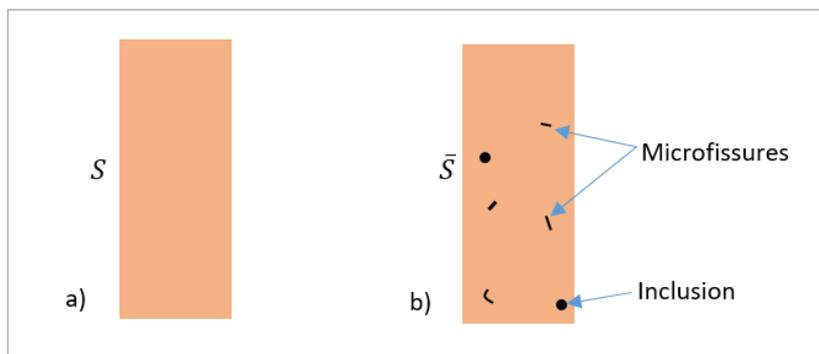


Fig. 2. a) Surface saine, b) Surface endommagée

Autrement dit:

$$D = 1 - \frac{\bar{S}}{S} \quad (4)$$

De (1), (2) et (4), la contrainte effective peut être exprimée par la relation suivante:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (5)$$

Les hypothèses d'équivalence en déformation supposent que le comportement à la déformation de la matière n'est affecté par l'endommagement que sous la seule forme de la contrainte effective. La loi de comportement du matériau endommagé est la même que celle du matériau sain. La loi de Hooke du matériau endommagé s'écrit donc:

$$\varepsilon = \frac{\bar{\sigma}}{E} \quad (6)$$

Avec ε : la déformation et E : le module d'élasticité du matériau en MPa.

De (5) et (6), nous avons la loi élastique constitutive de l'endommagement:

$$\sigma = E\varepsilon (1-D) \quad (7)$$

De plus, la loi de comportement purement élastique s'écrit:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (8)$$

De relations (7) et (8), nous avons:

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E} \quad (9)$$

E : module élastique du film sain (MPa); \bar{E} : module élastique du film endommagé (MPa)

D est tel que:

- Si $D = 0$, nous avons un matériau vierge; en bon état;
- Si $0 < D < 1$, il y a présence de microfissures qui génèrent une section résistante efficace où la chute du module d'élasticité est importante, c'est la phase du comportement élasto-endommageable;
- Si $D = 1$, on parle de dommage critique qui correspond à la rupture de l'élément volumique.

3.2 MESURES EXPERIMENTALES DE L'ENDOMMAGEMENT

La mesure de l'endommagement est faite à partir de l'évolution du module d'élasticité effectif obtenu par l'essai de traction [2]. La valeur instantanée du module d'Young permet donc de déterminer l'évolution de l'endommagement. Les résultats sont donnés dans le Tableau 1.

On remarque que le module élastique effectif diminue lorsque le déplacement augmente. Cela signifie que le composite perd en rigidité. En conséquence, il subit de plus en plus de destructions locales, puis totales dans le pire des cas. Cela explique l'augmentation des dégâts. Les valeurs mesurées ici sont celles du comportement global. En effet, jusqu'à un déplacement d'environ $Y = 0,8$ mm, il n'y a pas de rupture totale du film composite. Cependant, au niveau local, on a l'apparition de microfissures. Ce phénomène sera précisé dans la deuxième partie consacrée à la simulation du comportement élasto-endommageable.

Tableau 1. Module d'élasticité et Endommagement en fonction du déplacement

Déplacement Y (mm)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,51	0,2	0,6	0,7	0,8
Module d'élasticité effectif \bar{E} (MPa)	49,33	49,33	30,55	18,81	10,36	9,87	8,39	6,22	5,32
Endommagement D	0	0	0,38	0,61	0,78	0,80	0,82	0,87	0,89

4 SIMULATION DE L'ENDOMMAGEMENT DU COMPOSITE

4.1 DONNEES ET HYPOTHESES SUPPLEMENTAIRES

La discrétisation des structures par la méthode des éléments finis permet de localiser les dommages [4], Pour la simulation, nous avons utilisé le code de calcul par éléments finis Cast3M. En plus des hypothèses générales citées précédemment, nous utiliserons le mode de contraintes planes avec les éléments quadratiques à huit nœuds QUA8. L'endommagement est évalué en fonction du déplacement sous une contrainte de traction monotone. Ceci est plus pratique grâce à la linéarité entre déplacement et déformation. Les propriétés du composite obtenues à partir de nos travaux précédents sont répertoriées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Propriétés mécaniques du composite [2]

E [MPa]	ϵ_B [%]	$R_e (\sigma_B)$ [MPa]	ϵ_C [%]	$R_m (\sigma_C)$ [MPa]	A [%]	σ_B [MPa]
49,33	7,5	3,7	14	5,2	22	3,5

4.2 RESULTATS DE CALCULS NUMERIQUES

Dans les simulations suivantes, l'endommagement a été calculé en fonction de chaque valeur de déplacement Y prise de 0,1 à 0,8 mm. Dans un premier temps, nous avons utilisé une seule densité de maillage qui correspond à 100 éléments pour 341 nœuds afin de ne prendre en compte que l'influence du déplacement (Fig. 3).

Ensuite, la densité du maillage est faite varier de 1 à 30 éléments de chaque côté. Cela équivaut à des mailles de 1 et 900 éléments respectivement pour tout le volume de l'échantillon (respectivement 8 et 2821 nœuds) (Figure 3.). Au-delà de ces valeurs, le nombre maximum de sous-étapes est atteint compte tenu des hypothèses de calcul imposées.

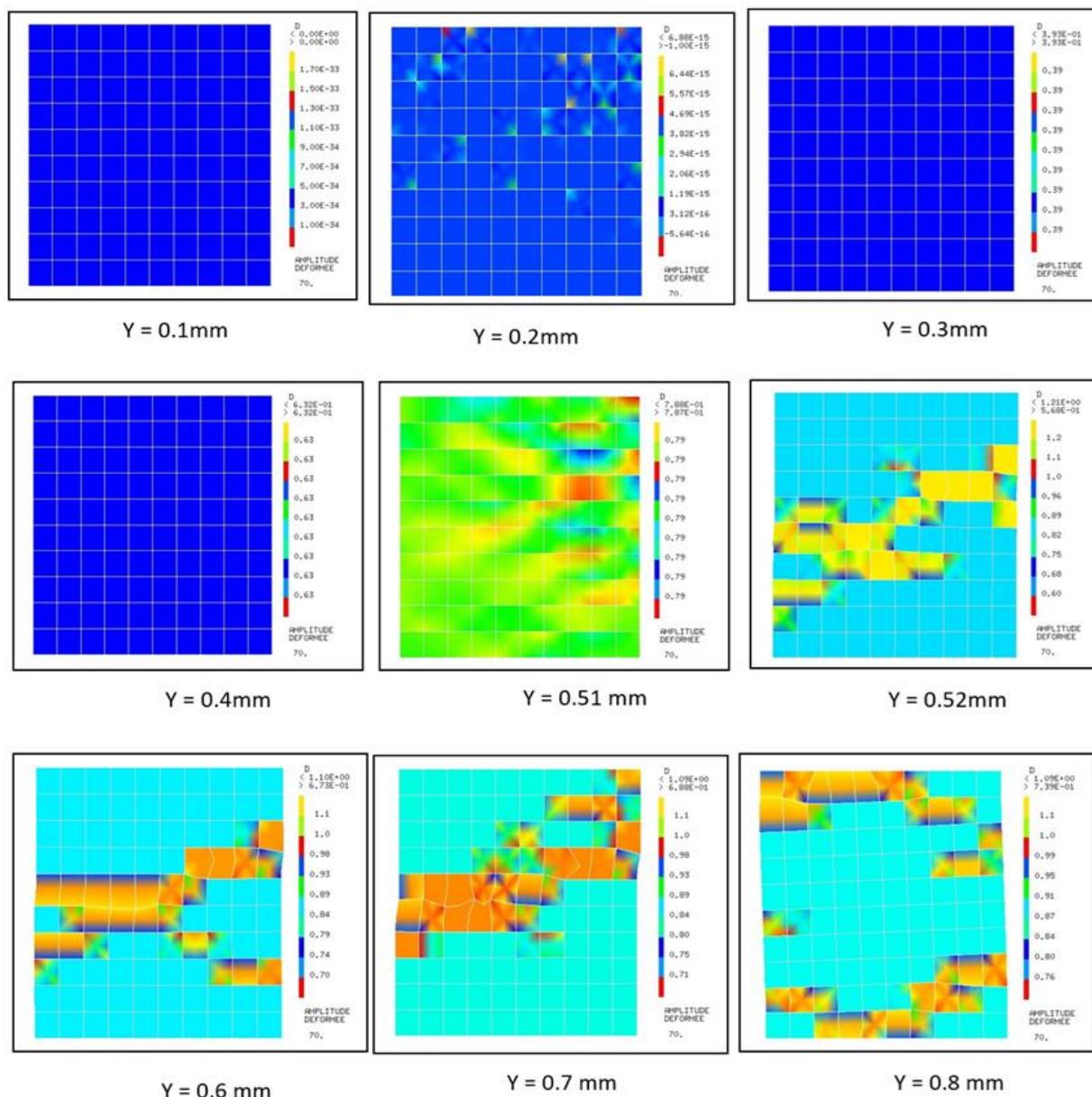


Fig. 3. Etats d'endommagement du film en fonction du déplacement

5 ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS NUMERIQUES

La discussion se concentre sur les données des figures 3 et 4. La figure 3. décrit l'état du comportement élastique endommageable du film sous des contraintes de traction.

Nous observons trois comportements principaux à mesure que le déplacement évolue. Le premier part de $Y = 0,1$ à $0,2$ mm, le second de $Y = 0,3$ à $0,51$ mm et le dernier à partir de $0,52$ mm. Dans un premier temps, le dommage est uniforme et pratiquement nul, $D=0$. Le comportement est similaire à celui d'un matériau sain. Cependant, pour $Y = 0,2$ mm, on observe une légère dispersion de la texture. En effet, lorsque le composite subit un faible chargement, il développe une résistance le temps d'une modification de sa structure. Ceci est dû à une réorientation des chaînes polymères dans le sens du chargement, une homogénéisation des discontinuités des interfaces fibres/chaînes polymères [2], [3]. Cet état permet au composite de résister de manière transitoire à de faibles contraintes. Dans la deuxième phase, le dommage augmente brusquement de 0 à 39 pour atteindre 79. Ceci est dû à une baisse des forces d'interface et à la propagation de microfissures qui proviennent essentiellement de l'élaboration du matériau. A ce niveau, le relais de la résistance est donné aux fibres. En effet, ceux-ci prennent le sens du chargement et avec un module élastique de 175 MPa [2], [3] oppose une rigidité à la destruction.

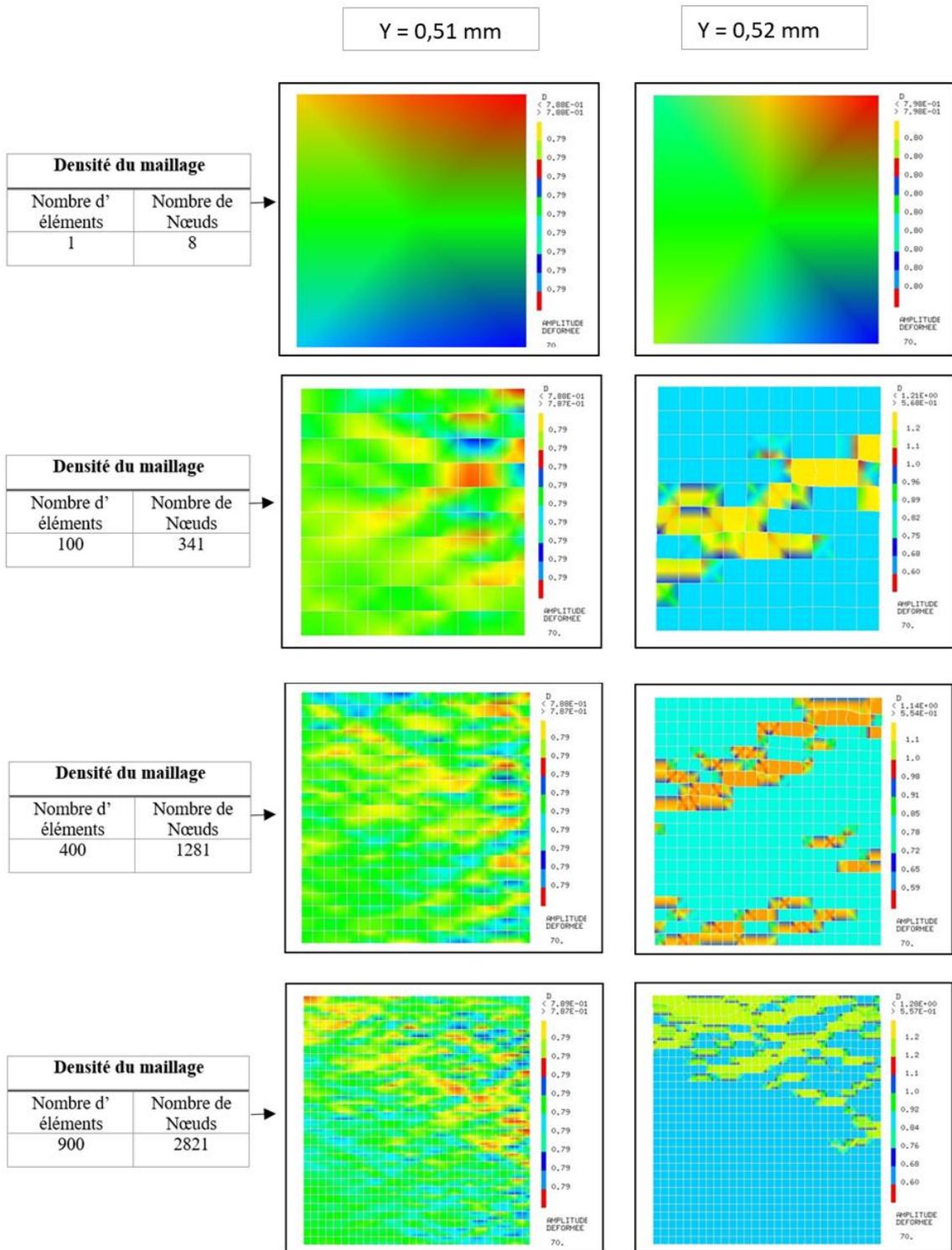


Fig. 4. Dispersion de l'endommagement du film en fonction de la densité du maillage

Pour $Y = 0,3$ à $Y = 0,4 \text{ mm}$, l'uniformité de la texture explique l'homogénéité mécanique du composite et la bonne dispersion du matériau avec des endommagements égaux respectivement à 0,39 et 0,79. Des microfissures apparaissent. Cette dégradation est plus remarquable autour de $Y = 0,51 \text{ mm}$ pour $D = 0,79$. Cette perte de résistance du composite est due à deux phénomènes qui peuvent coexister. La première est la destruction de l'interface fibre/amidon. Et la deuxième cause est la rupture progressive des chaînes polymères. A ce stade, ce sont des phénomènes qui n'ont qu'un impact local. Il n'y a donc pas de rupture au niveau global. A la dernière phase, à partir de $Y = 0,52 \text{ mm}$, on observe des valeurs d'endommagement $D = 1$. Cela signifie qu'il y a une dislocation partielle du matériau. En suivant les isovalues de $Y = 0,6$ à $0,8 \text{ mm}$, on constate que le

dommage devient de plus en plus important. Ceci révèle la rupture progressive des fibres. L'accumulation globale de ces dommages locaux pourrait conduire à la rupture totale du film.

La figure 3. présente l'influence de la densité du maillage sur l'endommagement. Pour des déplacements de $Y = 0,51$ et $Y = 0,52$, le nombre d'éléments (respectivement de nœuds) a été varié: 1; 100; 400 et 900 éléments (respectivement 8, 341, 1281 et 2821 nœuds). Nous avons fait deux observations. La première est qu'avant l'apparition de fractures locales, au voisinage de $Y = 0,51$ mm, l'endommagement existe, mais reste homogène et isotrope. Deuxièmement, à partir de $Y = 0,52$ mm, il devient de plus en plus grand ($D = 1$ localement). A ce niveau, on observe l'effet de la densité du maillage. En effet, plus celui-ci est important, plus on obtient une meilleure dispersion des dommages révélant ainsi les points initiateurs de fissures.

6 COMPARAISON DES RÉSULTATS ANALYTIQUES ET NUMÉRIQUES

Pour la simulation, nous avons utilisé un maillage à un élément car il donne le meilleur état de comportement global (voir Annexe). Les valeurs obtenues sont données dans le Tableau 3. On constate que les valeurs des dommages retrouvées par l'étude analytique et celles de la simulation numérique par le code informatique Cast3M sont en très bon accord (Fig. 4).

Cela permet de valider ces simulations. En guise de comparaison, nous avons également tracé les courbes représentatives de ces grandeurs analytiques et celles obtenues par la simulation.

Tableau 3. Comparaison des valeurs analytiques et numériques de l'endommagement D

Déplacement Y (mm)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,51	0,52	0,6	0,7	0,8
Valeurs Cast3M de D	~ 0	~ 0	0,39	0,63	0,79	0,80	0,83	0,86	0,88
Valeurs analytiques de D	0	0	0,38	0,61	0,78	0,80	0,82	0,87	0,89

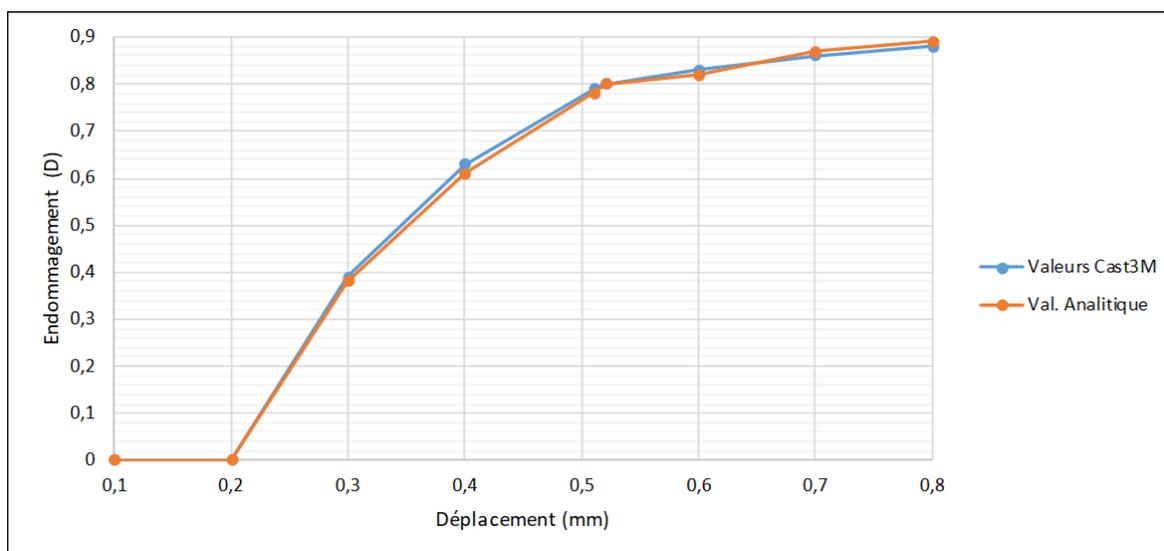


Fig. 5. Comparaison graphique des études analytique et Cast3M

7 CONCLUSION

Ce travail visait à analyser le comportement aux dommages d'un film à base d'amidon de manioc renforcé par les fibres de mésocarpe de coco. Pour ce faire, nous avons réalisé une étude analytique suivie de simulations numériques sous le code de calcul Cast3M. Les résultats obtenus pour les deux méthodes sont très concordants avec une différence d'un centième. Ils expliquent bien le comportement du composite. Par exemple, pour des déplacements de l'ordre de 0,52 mm, des fractures locales apparaissent. Cependant, pour les simulations, la densité du maillage permet une très bonne dispersion locale des dommages. Tout cela permet la validation et l'utilisation de ces simulations et montre l'exploitation de ce logiciel dans le domaine de la mécanique.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Service de Modélisation des Systèmes et Structures (DM2S) de la Direction de l'Énergie Nucléaire du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) pour la fourniture du logiciel Cast3M.

REFERENCES

- [1] Robert Schirrer et Christophe Fond, «Endommagement et rupture des polymères amorphes résistant au choc, Une vue basée sur la mécanique des milieux continus», Institut Charles Sadron, CNRS UPR 22, 23 rue du Liess, BP 84047, 67034 Strasbourg Cedex 2, 2008.
- [2] Ahmed Doumbia, Thèse unique de Doctorat, «Elaboration de matériaux composites à base d'amidon de manioc renforcés par les fibres de mésocarpes de coco: Etude De La Stabilité Physicochimique, Du Comportement Mécanique, Thermomécanique Et Applicabilité à L'Emballage», Institut National Polytechnique Félix Houphouet-Boigny, 2020.
- [3] Ahmed Doumbia, Pierre J.-M. R. Dable et Edja F. Assanvo, «Élaboration et caractérisation d'un matériau biodégradable à base d'amidon de manioc renforcé par les microfibres de mésocarpes de coco», Afrique SCIENCE, 14 (5), 400 – 414, 2018.
- [4] Batoz J.L. Dhatt G., «Modélisation des structures par élément finis. Poutres et Plaques», volume 2, Hermes Paris, 1990.
- [5] J. Mazars J., Thèse de Doctorat, «Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure», Paris 6, 1984.
- [6] J. Lemaitre, L. J. Chaboche, «Mécanique des matériaux solide», Dunod, Paris, 1998.

ANNEXE

ETATS D'ENDOMMAGEMENT DU COMPOSITE EN FONCTION DU DÉPLACEMENT Y POUR LA DENSITÉ DE MAILLE [1 ÉLÉMENT, 8 NŒUDS]

