



**HAL**  
open science

## Etude d'une unité logistique en matériaux biosourcés pour le transport

Mohamed Hichem Saihi, Francis Collombet, Sonia Sassi, Yves-Henri  
Grunevald

► **To cite this version:**

Mohamed Hichem Saihi, Francis Collombet, Sonia Sassi, Yves-Henri Grunevald. Etude d'une unité logistique en matériaux biosourcés pour le transport. Journées Nationales des Composites 23, Association pour les Matériaux Composites AMAC, Jul 2023, Besançon, France. hal-04291016

**HAL Id: hal-04291016**

**<https://hal.science/hal-04291016>**

Submitted on 17 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.

# Etude d'une unité logistique en matériaux biosourcés pour le transport

## *Study of a unitized load made of bio-based materials for transport*

Mohamed Hichem Saihi<sup>1</sup>, Francis Collombet<sup>1</sup>, Sonia Sassi<sup>1</sup>, Yves-Henri Grunevald<sup>2</sup>

1 : Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, CNRS, IMT Mines Albi, INSA Toulouse, ISAE-SUPAERO, UT3, 2, Rue Caroline Aigle, F-31400 Toulouse  
e-mail : mohamed-hichem.saihi@univ-tlse3.fr, francis.collombet@iut-tlse3.fr, sonia.sassi@iut-tlse3.fr

2 : CES Works, 131, Traverse de La Penne aux Camoins, BT 4, Actiparc 1, F-13821 La Penne Sur Huveaune  
e-mail : yh.grunevald@composites-expertise-solutions.com

### Résumé

Le cadre général de l'étude porte sur l'usage des matériaux biosourcés pour la conception d'unités logistiques. Ces unités logistiques doivent répondre à un cahier des charges de façon normative qui porte notamment sur l'étude de leur tenue mécanique associée aux différentes phases du transport. Le but de cette étude est le développement des outils numériques et expérimentaux adaptés à la conception d'unités logistiques en matériaux biosourcés. La méthodologie de conception est basée sur une approche calcul-essai, en ce sens qu'elle doit être capable de tenir compte des conditions particulières liées à l'usage des matériaux biosourcés comme matériaux de structure. La première étape présentée est la conception d'un modèle E.F. capable de restituer les conditions expérimentales de compression verticale imposées par une norme du transport. Lors de la seconde étape à partir des résultats expérimentaux sur une unité logistique, un ajustement des données d'entrée du modèle numérique issues de la littérature a été réalisé par une identification inverse en utilisant non seulement la zone linéaire des réponses force-déplacement de l'unité testée mais également les valeurs des champs de déplacement. La robustesse du modèle a été établie à partir de comparaisons satisfaisantes entre les résultats numériques et expérimentaux. Ce modèle est une aide à la décision en permettant la reconnaissance de zones d'intérêt au sein de l'unité logistique.

### Abstract

The context of the study concerns the use of biobased materials for the design of logistic units. These logistic units must answer several specifications in a normative way which relates particularly to study their mechanical behavior associated to various transport phases. The aim of this study is the development of numerical and experimental tools adapted to the design of logistic units using biobased materials. The design methodology is based on a calculation-testing approach, that it must be able to consider the particular conditions related to the use of biobased materials as structural materials. The first step presented is the design of an FE model able to reproduce the experimental conditions of vertical compression imposed by a transport standard. In the second step, based on the experimental results on a logistic unit, a fit of the numerical model input data from the literature was performed by an inverse identification using not only the linear part of the load-displacement responses of the tested unit but also the values of the displacement fields. A good agreement was found between the numerical and experimental results. This model becomes a decision aid and allows the recognition of areas of interest within the logistic unit.

**Mots clés :** Conception mécanique, emballage biosourcé, modélisation numérique, corrélation d'images numérique CIN, identification inverse.

**Keywords:** Mechanical design, biobased packaging, numerical modeling, digital images correlation DIC, reverse identification.

## 1. Introduction

Un des rôles de l'emballage est de protéger un produit contre les sollicitations mécaniques qui lui sont appliquées pendant le stockage et le transport. Les trois types d'emballage utilisés sont appelés respectivement, primaire, secondaire et tertiaire. L'emballage primaire est le contenant directement en contact avec le produit. L'emballage secondaire couvre l'emballage primaire afin de regrouper un certain nombre d'articles pour en faire une unité de vente. L'emballage tertiaire permet de regrouper

de grandes quantités de produits et de les transporter en toute sécurité. C'est le cas de l'unité logistique. Le niveau de protection du contenu requis est déterminé par la rigidité de l'unité logistique utilisée, ainsi que par la sévérité des risques auxquels elle peut être exposée. A l'ère où l'écologie est l'un des grands enjeux de la logistique, bon nombre d'entreprises commence à intégrer les matériaux biosourcés dans leur stratégie d'emballage afin de réduire l'impact environnemental généré par les emballages traditionnels. En réduisant l'utilisation de la matière première non-renouvelable dans la conception d'emballages en plastique, les emballages biosourcés pourraient être une valeur ajoutée dans les stratégies dites de Responsabilité Sociale des Entreprises (RSE). Le bois et le bambou sont des matériaux qui présentent des propriétés mécaniques [1], thermiques et fonctionnelles [2] en font des « bons candidats » pour les applications d'emballages biosourcés. Aujourd'hui, l'emballage biosourcé est beaucoup utilisé dans l'alimentaire et le cosmétique sous forme d'un emballage primaire ou secondaire [3] du fait des incitations réglementaires. Cependant, pas ou peu d'études concernent l'usage des matériaux biosourcés pour l'emballage tertiaire comme l'unité logistique. La compréhension des caractéristiques mécaniques de ces matériaux et de leur processus de fabrication doit s'envisager à toutes les échelles et pas en se cantonnant à celle du coupon élémentaire.

L'article porte particulièrement sur la tenue en compression du packaging (i.e. une situation correspondant aux conditions de stockage et d'empilage pour le transport en camion par exemple). Plus généralement, les travaux s'inscrivent dans le cadre d'une thèse en cours visant au développement d'un ensemble d'outils numériques (modèles E.F.) et expérimentaux (protocoles et techniques de mesures à différentes échelles) adapté à la conception d'unités logistiques en matériaux biosourcés. Il est connu que les propriétés des multi-matériaux biosourcés sont délicates à définir d'une part, à l'échelle d'un matériau dit « homogène équivalent » (du fait du besoin de « données d'entrée » d'un calcul par E.F.) et d'autre part, de façon représentative de la réalité du multi-matériau biosourcé dans la structure finale (qui n'est plus un coupon élémentaire). La première étape présentée est la conception d'un modèle E.F. capable de restituer les conditions expérimentales de compression verticale imposées par la norme ISTA 3E [4] en vigueur pour le transport. Lors de la seconde étape à partir des résultats issus de l'expérience sur plusieurs unités logistiques, on réalise un ajustement (recalage) des données d'entrée du modèle numérique [5] issues de la littérature (i.e. des propriétés du multi-matériau virtuel homogène équivalent) par une identification inverse en faisant le choix (compte tenu des hypothèses du calcul) de s'intéresser à la zone linéaire des réponses force-déplacement vertical de chacune des unités testées et les valeurs de champs de déplacement hors plan obtenues par CIN. Puis alimenté par les données d'entrée ajustées, le modèle numérique est utilisé pour comparer les champs de déformation calculés et ceux calculés par la CIN. L'évaluation de la robustesse du modèle permet un usage au titre d'une aide à la décision pour la reconnaissance de différentes zones d'intérêt au sein de l'unité logistique. Ces états locaux « critiques » sont restitués numériquement en faisant appel au concept d'évaluateurs technologiques ou évaluateurs de performance [6], puis d'une approche croisée calcul expérience qui ne nécessite plus de faire appel à la structure finale. La conception de ces évaluateurs ouvre alors un champ d'études originales sans qu'il n'y ait pas besoin de recourir à la réponse expérimentale de l'unité logistique qui, par définition, est l'objet final à concevoir. La finalité est de pouvoir optimiser la conception de nouvelles unités logistiques pour différentes architectures multi-matériaux, différentes conditions aux limites et différents process de fabrication, à partir d'une démarche de caractérisation expérimentale des propriétés des matériaux biosourcés au sein des évaluateurs.

## **2. Protocoles expérimentaux**

### **2.1. Matériau**

La caisse-palette RAJA en bois, déjà labellisée pour le transport (Fig. 1), est choisie comme « unité logistique école ». Il s'agit d'une caisse de dimensions 1200 x 800 x 600 mm<sup>3</sup> constituée de panneaux de bois manufacturés. Il s'agit d'un ensemble de 4 panneaux verticaux de 5 plis [0/90/0/90/0] chacun (assemblés par collage et pressage à chaud), reliés entre eux par des charnières métalliques en acier.

Le bouleau est utilisé pour les plis à 0° et l'eucalyptus pour ceux à 90°. Il est à noter qu'a priori le placement des panneaux de la caisse palette RAJA, et donc de la direction de leurs fibres, devrait être en accord avec le mode de sollicitation de ce type d'emballage, ce qui dans la pratique n'est pas le cas, car on a constaté des différences de positionnement d'une caisse à l'autre.



Fig. 1. Caisse-palette RAJA, <https://www.raja.fr/>

## 2.2. Expérience

Des essais de compression sont réalisés en respectant les consignes de la norme du transport ISTA 3E et en utilisant une machine de compression dédiées à la qualification des emballages au sein de la plateforme ILIPACK [7] (Fig. 2). L'unité est préconditionnée à la température et à l'humidité ambiantes du laboratoire pendant 24 heures avant l'essai.

Les essais font l'objet de mesures et de calculs par la méthode de corrélation d'images numérique CIN pour disposer d'informations locales sur les champs de déplacement de l'unité logistique pendant la sollicitation de compression [8]. Les premiers essais de compression sur unités logistiques font apparaître l'intérêt de privilégier plutôt le suivi de leurs grands panneaux (dans la longueur de la caisse) par rapport à leurs petits panneaux. On remarque une symétrie dans la réponse mécanique au sein d'un même panneau. Ainsi, nous avons choisi une mesure des champs de déplacement sur la moitié de la surface du grand panneau de la caisse pendant la compression. Cinq essais de compression sont réalisés dans ces conditions de mesure.

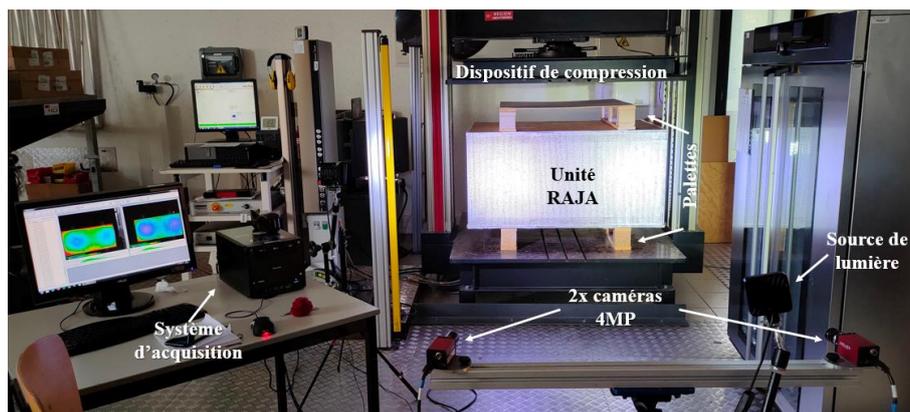


Fig. 2. Vue du test de compression verticale avec le dispositif de mesure de champs (CIN) au 1<sup>er</sup> plan

## 3. Modèle éléments finis d'une unité logistique sous compression

Un modèle éléments finis est développé à l'aide du logiciel « Abaqus » pour simuler l'essai statique de compression verticale sur l'unité de référence RAJA conformément à la norme d'essai ISTA 3E. Une analyse dynamique implicite avec une géométrie non linéaire est attribuée à ce modèle. Les différentes parties de la caisse RAJA sont modélisées à l'aide d'éléments linéaires quadrilatéraux

coques, à l'exception des palettes qui sont représentées à l'aide d'éléments déformables 3D en raison de leur forme (Fig. 3). La modélisation 2D permet de réduire le temps de calcul de la simulation compte tenu des dimensions de la structure étudiée et de la volonté de faciliter la corrélation calcul-essai (Fig. 3). Le plateau de compression mobile est modélisé à l'aide d'éléments de coques rigides. Le matériau, attribué aux panneaux verticaux au fond et au couvercle, est un contreplaqué de bouleau, qui est modélisé comme un matériau orthotrope homogénéisé d'une épaisseur de 6 mm (Tab. 1). Le matériau utilisé pour la palette est le peuplier, en le considérant comme un matériau isotrope pour alléger les calculs. Notre démarche consiste à considérer, comme valeurs utilisées comme données d'entrée du modèle, des caractéristiques mécaniques matériau issues d'essais sur éprouvettes élémentaires disponibles dans la littérature (Tab.1).

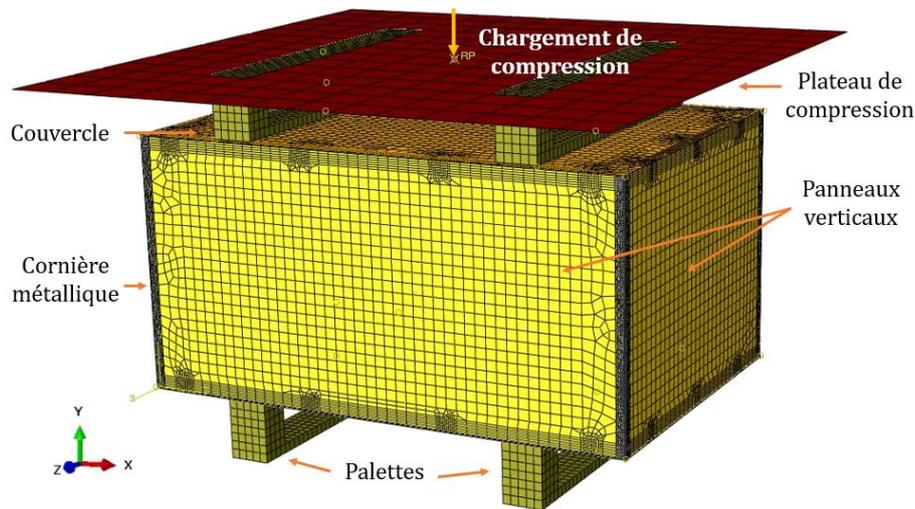


Fig. 3. Vue du modèle éléments finis d'essai de compression sur l'unité RAJA

Matériau	Densité (t/mm <sup>3</sup> )	Limite de traction $X_t = Y_t$ (MPa)	Limite de compression $X_c = Y_c$ (MPa)	Limite de cisaillement $S_{12}$ (MPa)	$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)
Bouleau	$6.9 \cdot 10^{-10}$	110	52	12	9400	6700
$E_3$ (MPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$G_{12}$ (MPa)	$G_{13}$ (MPa)	$G_{23}$ (MPa)
1100	0.034	0.431	0.439	610	206	186

Tab. 1. Propriétés mécaniques d'une plaque en bouleau d'après [9,10].

#### 4. Résultats et discussion

La Fig. 4 illustre les réponses expérimentales et numériques « force-déplacement » lors des essais de compression. Compte tenu des hypothèses simples du modèle E.F. (comportement élastique non linéaire sans endommagement), on choisit de ne s'intéresser qu'à la réponse linéaire élastique de la caisse étudiée. Il était attendu de constater une différence significative entre les valeurs des raideurs expérimentale et numérique. Cette différence s'explique aussi par le fait que les paramètres d'entrée du modèle ne sont pas représentatifs de la réponse locale du matériau dans la caisse.

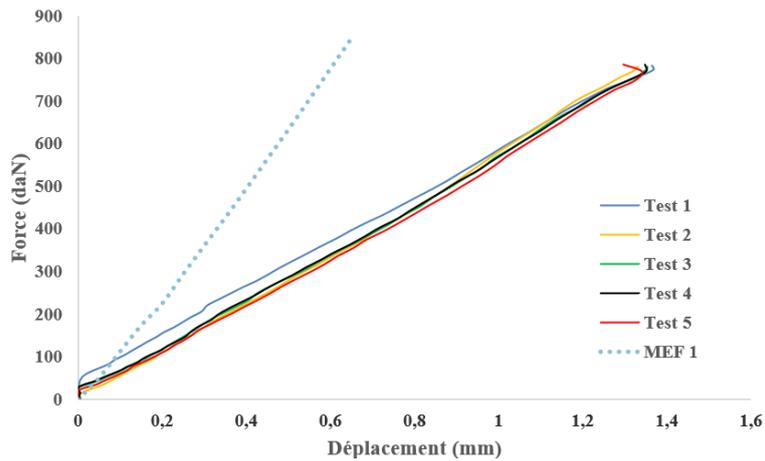


Fig. 4. Allure force-déplacement des essais de compression expérimentaux et numériques avant recalage des données d'entrée

Un ajustement de la réponse numérique de la caisse « charge-déplacement » par rapport à celle expérimentale est proposé afin d'identifier les propriétés mécaniques de la structure étudiée. Cet ajustement de la raideur numérique par rapport à celle expérimentale est réalisé en faisant varier les modules d'élasticité longitudinal  $E_1$  et transversal  $E_2$  du matériau homogène équivalent. Quatre étapes d'ajustement sont nécessaires jusqu'à l'obtention de valeurs « adéquates » des modules d'élasticité (MEF 4), soit  $E_1=3100$  MPa et  $E_2=2100$  MPa (Fig. 5).

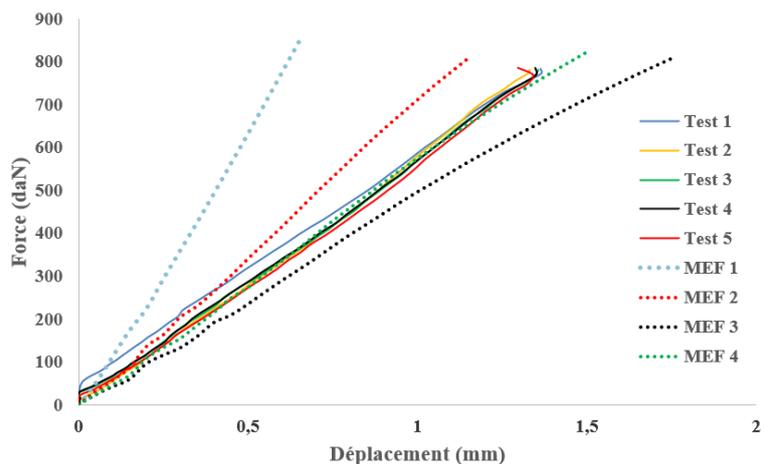


Fig. 5. Allure force-déplacement des essais de compression expérimentaux et numériques au cours du recalage des données d'entrée.

Le modèle numérique, alimenté par les données d'entrée ajustées, est ensuite utilisé pour comparer les champs de déplacement et de déformation calculés par E.F. et ceux calculés à partir de la mesure par CIN. Les Fig. 6 et Fig.7 présentent les variations des champs de déplacement et de déformation numérique et expérimentale. On note une similarité des profils numériques et expérimentaux des déplacements hors plan et de déformations au sein du matériau. En revanche, on constate une différence significative des ordres de grandeur. Cette investigation nous permet de déduire que la qualité de l'ajustement du modèle par rapport à la raideur du matériau est insuffisante pour l'identification des paramètres d'entrée du modèle.

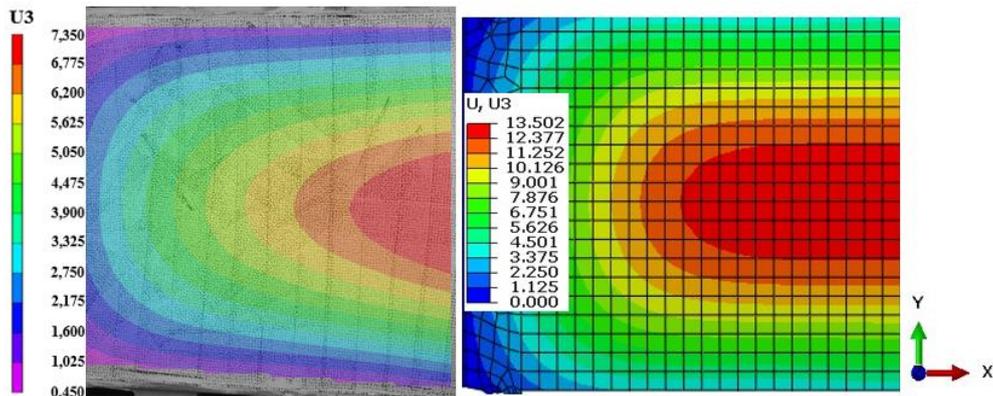


Fig. 6. Champs de déplacement hors plan, expérimental (à gauche) et numérique (à droite), à 780 daN de charge.

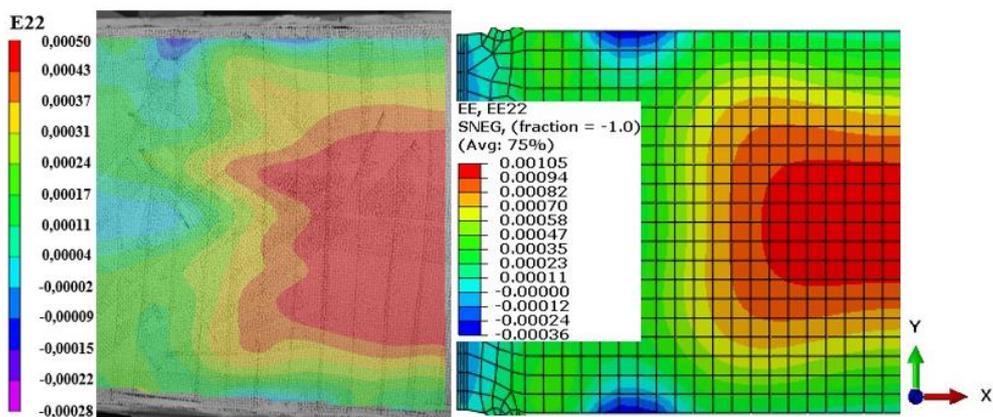


Fig. 7. Champs de déformation transversale (i.e. la direction suivant y), expérimental (à gauche), numérique à droite, à 780 daN de charge.

Une deuxième étape d'ajustement est réalisée en faisant appel aux champs de déplacement et de déformation numériques dans la zone linéaire des réponses force-déplacement. Cette méthode consiste à ajuster les paramètres d'entrée du modèle (les modules d'élasticité) jusqu'à atteindre une correspondance entre les champs de déplacement et de déformation expérimentaux et numériques. Cependant, les méthodes de calcul utilisées par les logiciels (VIC 3D) et (Abaqus EF) sont différentes. En effet, ces deux logiciels n'utilisent pas le même repère des données, ni la même distribution des points pour le calcul des champs de déplacement et de déformation. Ainsi, il est nécessaire de d'assurer une correspondance des points de mesure, c'est-à-dire de les mettre dans le même repère pour pouvoir comparer les valeurs des champs expérimentaux (analysés par VIC 3D) et numériques (obtenus par Abaqus) aux mêmes points de l'espace. Pour ce faire, nous avons développé un algorithme d'interpolation en utilisant le programme Matlab qui consiste à :

- choisir une zone d'analyse identique du panneau à étudier pour pouvoir comparer les champs expérimentaux et numériques,
- corriger le désalignement des points expérimentaux lié à la distorsion géométrique induite par le système optique utilisé pendant l'acquisition,
- interpoler les points expérimentaux en se référant au repère des points numériques. Cela nous permet de faire correspondre les coordonnées des points dans le même repère.

La Fig. 8 présente les champs de déplacement hors plan issus de cette interpolation avec les mêmes coordonnées des points. La similarité des profils est encore observée. En revanche, les ordres de grandeurs des valeurs expérimentales et numériques sont beaucoup plus en accord, pour les mêmes valeurs des modules  $E_1 = 3000$  MPa et  $E_2 = 2100$  MPa.

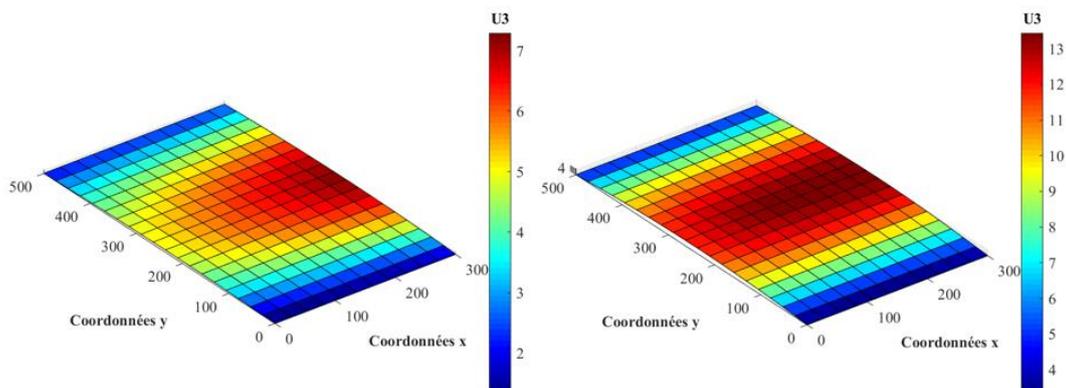


Fig. 8. Champs de déplacement, expérimental (à gauche) et numérique (à droite) avant le recalage par rapport aux champs, sur MATLAB

Cette deuxième étape d’ajustement du modèle numérique peut être alors affinée car il devient possible d’identifier les paramètres d’entrée du modèle que sont  $E_1$  et  $E_2$ . Pour cela, les valeurs des modules d’élasticité du matériau sont modifiées jusqu’à obtenir une correspondance entre les valeurs des champs de déplacement hors plan numériques et expérimentales (Fig. 9 et Fig. 10). Les modules d’élasticité longitudinal et transversal identifiés sont respectivement 4400 MPa et 3520 MPa. Les Fig. 9 et Fig. 10 affichent les valeurs de champs de déplacement et de déformation numériques « ajustés » et expérimentaux. Elles montrent une adéquation acceptable entre les valeurs des champs mesurés et celles calculées, ce qui prouve l’intérêt du modèle proposé.

La validation du modèle défini nous permet d’identifier différentes zones d’intérêt au sein de l’unité logistique. Ces états sont l’objet d’une étude spécifique en cours en faisant appel au concept d’évaluateurs de performance. Les évaluateurs de performance sont des pièces de dimensions plus réduites que la pièce finale. Les conditions aux limites et la cinématique de chargement à identifier pour leur utilisation permettent de restituer un état local équivalent à celui existant au sein de la zone d’intérêt de l’unité logistique et ce via le bâti d’essai modulaire développé à l’ICA [6]. Cette démarche a pour but d’optimiser la conception de nouvelles unités logistiques pour différentes architectures multi-matériaux en utilisant les fibres du bambou [11]. L’intérêt de la démarche est de n’avoir recours qu’aux évaluateurs technologiques, fabriqués en grand nombre, et qui font sens par rapport aux coupons élémentaires, avant d’investir dans un test de validation sur l’unité logistique finale.

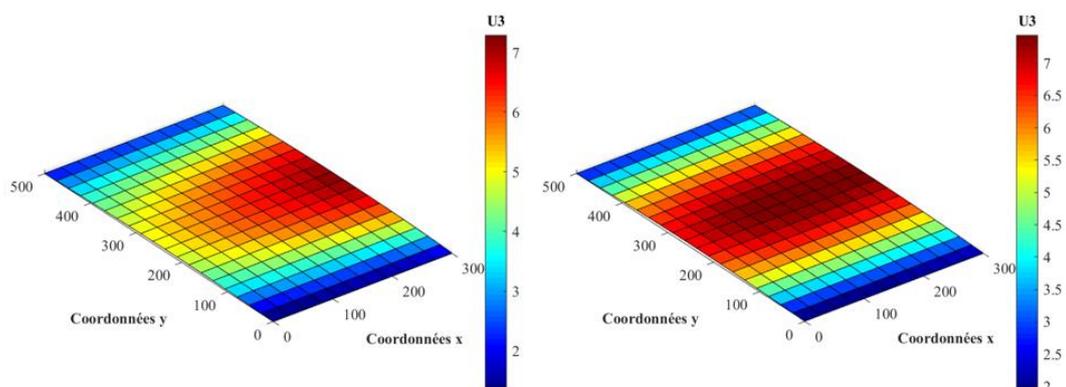


Fig. 9. Champs de déplacement, expérimental (à gauche) et numérique (à droite) après recalage par rapport aux champs, sur MATLAB.

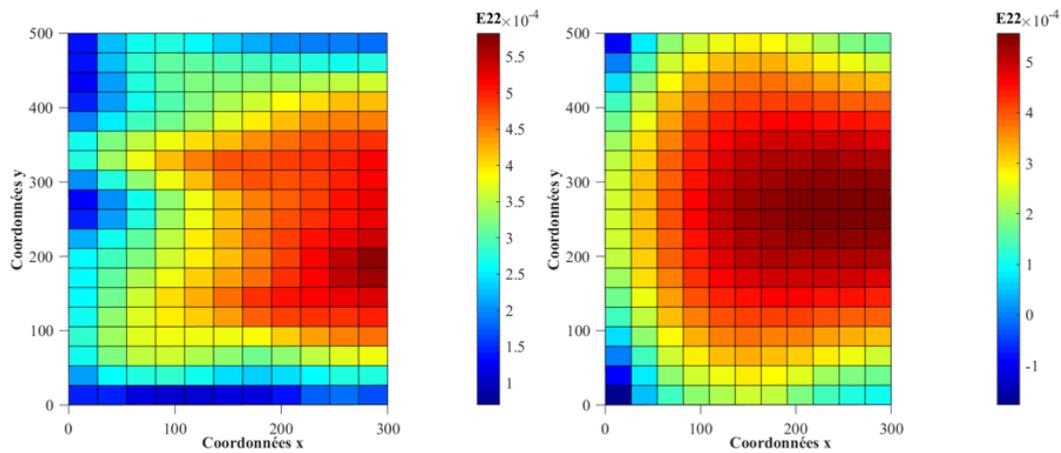


Fig. 10. Champs de déformation transversale, expérimental (à gauche) et numérique (à droite) après recalage par rapport aux champs, sur MATLAB

## 5. Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté une partie de notre approche de développement d'un ensemble d'outils numériques (modèles E.F.) et expérimentaux (protocoles et techniques de mesures à différentes échelles) adapté à la conception d'unités logistiques en matériaux biosourcés. La méthodologie de conception proposée est basée sur une approche croisée calcul/essai originale, en ce sens qu'elle doit être capable de tenir compte des conditions particulières liées à l'usage des matériaux biosourcés comme matériaux de structure. La conception d'un modèle E.F capable de restituer les conditions expérimentales de compression verticale imposée par la norme ISTA 3E en vigueur pour le transport a été proposée. Un ajustement des données d'entrée du modèle numérique issues de la littérature a été réalisé dans une première étape via une identification inverse, en utilisant la zone linéaire des réponses force-déplacement vertical de chacune des caisses testées. Les résultats ont prouvé que cette première étape d'ajustement n'était pas suffisamment satisfaisante pour valider le modèle numérique. Une étape d'ajustement complémentaire du modèle a été effectuée par identification inverse en utilisant les valeurs maximales des champs de déplacements hors plan. L'adéquation entre les résultats numériques et expérimentaux obtenue nous a permis de valider la robustesse du modèle développé. Ce modèle nous aide, dans l'étude en cours, à concevoir des évaluateurs de performance afin d'optimiser la conception de nouvelles unités logistiques pour différentes architectures multi-matériaux, notamment celles développées par la société Cobratex établie à Carbone en Région Occitanie [11].

## Remerciements

Les auteurs remercient la Région Occitanie et l'IUT Paul Sabatier pour le financement de la bourse de thèse de monsieur Hichem Saihi. Notre gratitude va encore vers la Région Occitanie, ainsi que la plateforme Ilipack du site de Castres de l'IUT Paul Sabatier, pour leur aide financière à la réalisation de ces travaux. Nous remercions enfin la société Cobratex de Carbone en Occitanie pour la qualité de son accompagnement technique dans le cadre de cette étude.

## Références

- [1] Duhovic M, Peterson S, Jayaraman K (2008) Natural-fibre-biodegradable polymer composites for packaging. In: Properties and performance of natural-fibre composites. Elsevier, pp. 301–329
- [2] Sahu P, Gupta M (2020) A review on the properties of natural fibres and its biocomposites: effect of alkali treatment. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications 234, pp. 198–217
- [3] Darwin S, Prajna G, Tamba T (2021) Bamboo fiber-PLA composite materials for disposable food and beverages packaging tools: a brief review. In: IOP Conference Series: Earth and Env. Science. IOP Publishing, p 012087

- [4] <https://ista.org/docs/3Eoverview.pdf>
- [5] Petureau L, Doumalin P, Bremand F (2019) Identification of local elastic parameters in heterogeneous materials using a parallelized FEMU method. *Int. Journal of Applied Mechanics and Engineering*, vol. 24, n° 4, pp. 140-156
- [6] Collombet F, Grunevald YH, Crouzeix L, Douchin B, Zitoun R, Davila Y, Cerisier A, Thévenin R (2015) Repairing composites, in: *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*, Woodhead Publishing, pp. 197-227
- [7] <https://ilipack.fr/>
- [8] Viguié J, Dumont PJJ (2013) Analytical post-buckling model of corrugated board panels using digital image correlation measurements, *Composite Structures*, 101, pp. 243–254
- [9] Wang T, Wang Y, Crocetti R et al. (2022) In-plane mechanical properties of birch plywood. *Construction and Building Materials*, vol. 340, p. 127852.
- [10] <http://www.atomer.fr/1/Proprietes-mecaniques-des-essences-de-bois.html>
- [11] <https://www.cobratex.com/>