

Apport de nouvelles techniques expérimentales à l'étude des comportements mécanique et hygroexpansif des emballages carton

Jérémy Viguié^{1*}, Pierre J. J. Dumont¹, Sabine Rolland du Roscoat^{2,3}, Pierre Vacher⁴, Laurent Orgéas², Isabelle Desloges¹, Évelyne Mauret¹, Jean-François Bloch¹

¹ CNRS / Université de Grenoble / Institut Polytechnique de Grenoble (Grenoble INP), Laboratoire de Génie des Procédés Papetiers (LGP2), BP 65, 38402 Saint-Martin-d'Hères cedex, France

² CNRS / Université de Grenoble / Grenoble INP / UJF-Grenoble 1, Laboratoire Sols-Solides-Structures-Risques (3SR Lab), BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France

³ European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), ID 19 Topography and Microtomography Group, 38043 Grenoble cedex 9, France

⁴ Université de Savoie, Laboratoire SYMME, Polytech Savoie, Domaine Universitaire, BP 80439, 74944 Annecy-le-Vieux, France

* Adresse actuelle : CNRS / Université de Toulouse / Institut Polytechnique de Toulouse (INPT), Laboratoire de Génie Chimique (LGC), Domaine Universitaire, 31062 Toulouse, France

Auteur à joindre pour toute correspondance : pierre.dumont@grenoble-inp.fr

Mots clés : microtomographie à rayons X, corrélation d'images, cartons, hygroexpansion, flambement, microstructures fibreuses

1 Introduction

Les cartons sont très largement utilisés dans le secteur de l'emballage rigide. À cette fin, ils doivent assurer la protection de leur contenu au cours des opérations de conditionnement et de logistique qui consistent à emballer, regrouper, transporter et stocker les produits. Ils doivent également communiquer des informations sur ces produits afin de pouvoir les identifier et les rendre attractifs. Pour remplir ces fonctions, les cartons doivent répondre à certaines exigences spécifiques. Par exemple, ils doivent être résistants afin de constituer la structure d'un emballage. Ils doivent également être mécanisables (pouvoir passer sur les machines de transformation et de conditionnement) afin de garantir les cadences de production. Enfin, ils doivent être imprimables pour servir de support d'informations.

Il existe deux familles principales de cartons qui se distinguent par leur structure : le carton plat et le carton ondulé. Le carton plat est souvent issu de l'association à l'état humide de plusieurs feuilles de papier. Le carton ondulé est issu du collage de feuilles planes et d'une ou plusieurs feuilles ondulées. Les feuilles de papier possè-

dent une microstructure extrêmement complexe. Elles forment en effet des réseaux essentiellement plans de fibres cellulosiques enchevêtrées contenant des charges minérales et des adjuvants. Les opérations de fabrication de ces feuilles induisent une forte anisotropie de leurs propriétés mécaniques. Dans le plan de ces feuilles, on distingue ainsi le Sens Marche ou Sens Machine (SM) et le Sens Travers (ST) pour désigner les directions principales de cette anisotropie induite lors de la fabrication.

Différents problèmes liés à l'utilisation du carton comme matériau d'emballage peuvent être identifiés dont la non-uniformité d'impression du carton ondulé (liée à sa structure particulière), l'instabilité dimensionnelle lors de variations de l'humidité relative de l'air ambiant (à l'origine d'une perte d'aplat), le délaminage (séparation des couches) lors de l'impression lithographique offset du carton plat ou du refoulement du carton ondulé, mais également la ruine des emballages induite par de fortes contraintes de compression à l'origine de phénomènes de flambement [1].

Aujourd'hui, il existe de nouvelles techniques expérimentales permettant de mieux appréhender les phénomènes

décrits ci-dessus. La microtomographie à rayons X constitue l'une d'entre elles. Elle se révèle être un excellent outil pour caractériser la microstructure fibreuse des papiers de manière non invasive [2]. Par ailleurs, la méthode de corrélation d'images est actuellement largement utilisée pour la mesure de champs cinématiques en mécanique des matériaux [3,4,11], mais reste encore relativement peu mise en application dans le cas des matériaux fibreux désordonnés (papiers, cartons, feutres, composites) [3,5]. Dans cette contribution, nous donnons deux exemples d'utilisation de ces méthodes appliquées au domaine des cartons :

- l'utilisation couplée de la microtomographie à rayons X et d'une méthode de corrélation d'images 2D pour la mesure des déformations à l'échelle du réseau fibreux permettant l'étude de l'hygroexpansion du carton plat,
- une méthode de stéréo-corrélation d'images permettant la caractérisation de l'évolution du champ de déformation de panneaux d'une structure d'emballage en carton ondulé au cours d'un essai de compression-flambement.

2 Matériaux et méthodes expérimentales

2.1 Matériaux

Pour l'étude des phénomènes d'hygroexpansion, le carton plat utilisé est issu d'un assemblage par superposition de couches de pâtes à papier vierges. Il est constitué de trois couches pigmentaires, de trois couches extérieures issues de pâtes chimiques blanchies (BCP) et de cinq couches intérieures issues de pâtes mécaniques blanchies (BMP) et non blanchies (MP) pour un grammage total de 450 g/m² et une épaisseur totale de 0,71 mm.

Pour l'étude des phénomènes de flambement, le carton ondulé utilisé est de type double face avec un profil de cannelure G (cannelure de hauteur 0,45 mm et pas de 0,94 mm). Il comporte un papier couverture d'un grammage de 160 g/m², un papier cannelure d'un grammage de 110 g/m² et un papier couverture d'un grammage de 140 g/m². La cohésion de l'ensemble est assurée par une colle à base d'amidon (grammage total de 450 g/m² et épaisseur totale de 0,78 mm). Dans le cadre de cette étude, ce carton est utilisé pour fabriquer des structures d'emballage sous forme de boîtes à base carrée. Les poses (ou patrons) des boîtes sont constitués de lignes de rainage et d'une patte de collage permettant la mise en volume. Des rabats sont présents sur chaque panneau pour assurer la fermeture complète des boîtes. Notons

que l'axe de compression de la boîte correspond au sens travers du matériau pour les panneaux latéraux verticaux.

2.2 Suivi *in situ* des phénomènes d'hygroexpansion du carton plat à l'échelle micrométrique par microtomographie à rayons X

La microtomographie à rayons X a été utilisée pour étudier *in situ* l'hygroexpansion du carton plat. Pour ceci, un dispositif de génération d'air humide a été installé sur la ligne ID19 de l'ESRF (Grenoble), ce qui a permis de soumettre les échantillons testés à un saut d'humidité relative de l'air ambiant de 20% à 50% HR au cours de l'essai. Des échantillons de 1,4 × 1,4 × (épaisseur du carton) mm³ ont été imagés (énergie des rayons X de 20,5 keV, 1500 projections radiographiques, détecteur 2048 × 2048 pixels). La figure 1(a) donne un exemple de visualisation 3D de cette structure. La taille des voxels (pixels en 3D) de ces images, de 0,7 μm de côté, permet de donner une bonne description des détails de la microstructure fibreuse du carton plat. Dans la suite, les images reconstruites en niveaux de gris à partir des projections radiographiques ont d'abord été « débruitées », puis utilisées telles quelles afin d'en extraire des plans de coupe des échantillons sur lesquels la méthode de corrélation d'images 2D a été appliquée (voir ci-dessous). Parallèlement, afin d'analyser quantitativement la porosité de ces échantillons, la phase poreuse et la phase fibreuse ont été séparées par une opération de segmentation particulière pour les matériaux papiers et cartons détaillée en [2] et [12].

2.3 Dispositifs de compression des emballages en carton ondulé et d'acquisition d'images pour la stéréo-corrélation

Les essais de compression ont été réalisés sur une presse Instron 5569 (force maximale 100 kN, vitesse maximale 500 mm/min) à une vitesse de compression de 13 mm/min sur une série de boîtes en carton ondulé G de diverses dimensions. Pour permettre la mise en oeuvre de la méthode de stéréo-corrélation [4,11], les panneaux des boîtes testées ont été recouverts d'un mouchetis à l'aide d'un spray de peinture noire. Deux appareils photo numériques (3872 × 2592 pixels) ont été fixés sur une traverse face à l'échantillon. Ces deux appareils ont pris simultanément deux photos de la boîte toutes les 5 s au cours de la déformation. Celui-ci ayant une durée de 20 s à 30 s,

suivant la géométrie de la boîte testée, quatre à cinq paires d'images par essai ont pu être obtenues.

2.4 Méthodes de corrélation d'images 2D et de stéréo-corrélation

Les techniques de corrélation d'images 2D et de stéréo-corrélation qui ont été mises en œuvre pour mesurer les champs de déplacement induits dans les cartons étudiés par les phénomènes d'hygroexpansion et de flambement utilisent le logiciel 7D développé par Vacher *et al.* [6]. Les champs de déplacement induits par le phénomène d'hygroexpansion du carton plat ont été étudiés sur des plans de coupe (500×1280 pixels) extraits des images microtomographiques des échantillons. Dans ces plans de coupe, les variations de niveaux de gris entre les pixels, induites par les variations de densité des constituants des cartons, créent naturellement des motifs aléatoires (cf. **figure 1(b)**). Ceci a permis, pour la mise en application de la méthode de corrélation, de construire sur ces plans une grille de motifs élémentaires de 30×30 pixels dont on a déterminé les déplacements entre les deux états d'humidification par la méthode de corrélation 2D. Une des difficultés rencontrées pour ces mesures a été de retrouver l'image du plan de référence choisi dans les différents états déformés de l'échantillon. Pour ceci, la corrélation est menée sur une série de plans candidats

situés dans une position proche du plan initial dans l'image déformée. L'étude a montré qu'il était possible de corréler ces plans de l'état déformé avec le plan de référence. Parmi ces plans candidats, nous avons choisi de ne considérer que le plan satisfaisant le mieux au critère de corrélation choisi ($> 75\%$). Étant donné que la totalité des motifs n'est pas retrouvée, les cartes de déplacements restent par endroits incomplètes. Les déplacements sont ensuite ré-interpolés (Matlab, fonction « Griddata »), puis lissés (fonction « Smooth »).

Dans le cas de l'étude du flambement des panneaux des boîtes en carton ondulé, la méthode de stéréo-corrélation s'appuie sur le suivi du déplacement du mouchetis créée à la surface des panneaux à l'aide de motifs 10×10 pixels (**figure 2(b)**). La méthode a permis de décrire le champ de déplacement 3D de deux des quatre surfaces latérales verticales de la boîte étudiée. Ces champs ont pu être projetés et ré-interpolés dans des repères liés à la surface de chaque panneau étudié (dans leur état non déformé) et ont également été lissés de la même manière qu'en 2D.

Pour les deux méthodes, les composantes du champ de déformation de Green-Lagrange 2D ont été calculées à partir de la donnée des champs de déplacement par un schéma de dérivation de type différences finies centrées.

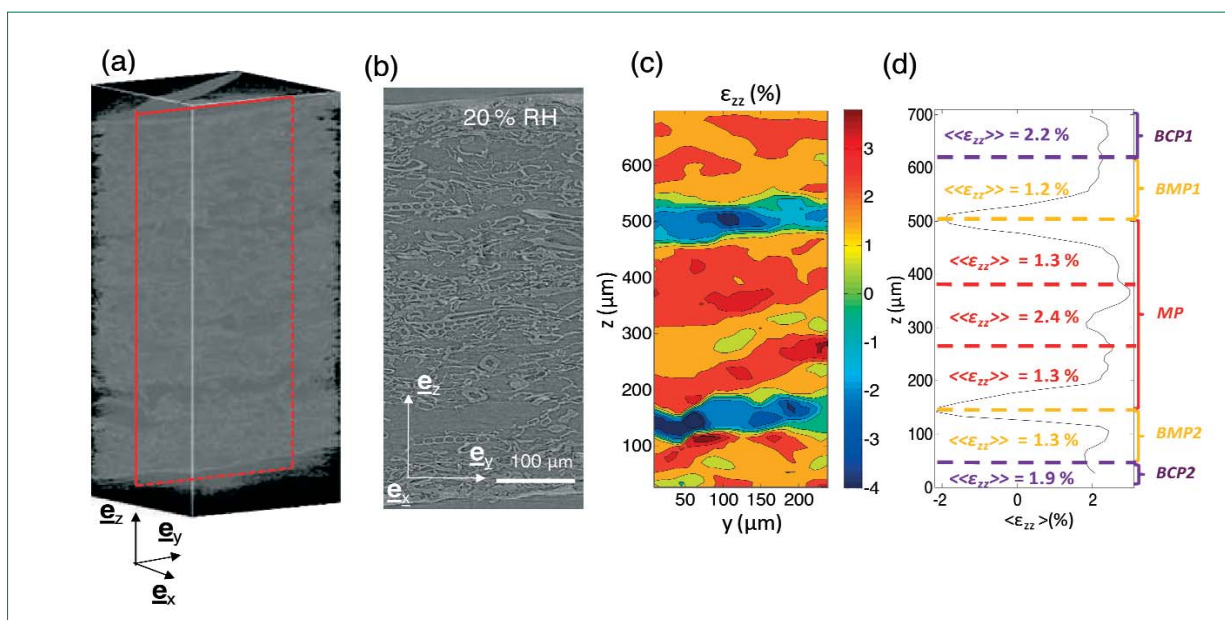


Figure 1 : (a) Visualisation 3D du carton plat à une humidité relative de 20%. (b) Coupe (e_y, e_z) selon l'épaisseur. (c) Carte de la composante ϵ_{zz} du champ de déformation du carton plat évaluée à partir des déplacements mesurés dans le plan (e_y, e_z) pour une variation d'humidité relative de 20% à 50%. (d) Profil de déformation moyen $\langle \epsilon_{zz} \rangle$ selon l'épaisseur et valeurs moyennes par couche.

3 Résultats et discussion

3.1 Champs de déformation du carton plat induits par l'hygroexpansion

Les composantes du tenseur des déformations de Green-Lagrange ont été évaluées à partir des déplacements dans les plans choisis pour l'analyse. Nous avons pu observer que la contribution au champ de déformation des termes de gradients du second ordre était négligeable, ce qui a pour effet que le tenseur de déformation peut se réduire au tenseur des petites déformations. Sur la **figure 1(c)**, on donne un exemple de représentation de la carte de la composante ϵ_{zz} de l'hygroexpansion selon la direction z mesurée dans le plan $(\mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$ pour un saut d'humidité relative de 20% à 50%.

On a pu montrer que les valeurs moyennes $\langle\langle \epsilon_{xx} \rangle\rangle = 0,10\%$, $\langle\langle \epsilon_{yy} \rangle\rangle = 0,23\%$ et $\langle\langle \epsilon_{zz} \rangle\rangle = 1,6\%$ calculées sur les différents plans testés sont extrêmement proches des valeurs mesurées à l'échelle macroscopique, respectivement égales à 0,11%, 0,27% et 1,7%, par des moyens conventionnels justifiant ainsi la validité de la méthode proposée. Par ailleurs, on constate que les déformations les plus élevées atteintes dans la direction z , sont d'un ordre plus élevé que dans le plan confirmant des résultats expérimentaux de Salmén et Fellers [7] à l'échelle macroscopique. Ce comportement particulier est relié au comportement hygroexpansif anisotrope des fibres (hygroexpansion d'un ordre plus élevé transversalement que longitudinalement) et à leur orientation plutôt plane dans le réseau fibreux. À l'échelle microscopique, toutes les composantes du champ de déformation présentent une très forte hétérogénéité. Relier ces hétérogénéités à l'agencement de la microstructure fibreuse est difficile pour les composantes planes du champ de déformation. Néanmoins, un lien a pu être établi entre la nature des strates (pâtes chimiques ou mécaniques), leur fraction volumique de fibres et le profil de $\langle\epsilon_{zz}\rangle$ selon l'épaisseur du carton plat (**cf. figure 1(d)**). Par ce biais, il est possible d'identifier les mécanismes de l'hygroexpansion. Ainsi, la déformation $\langle\epsilon_{zz}\rangle$ des couches de faible fraction fibreuse ($< 38\%$ dans notre cas) est faible (de l'ordre de 1,3%). Pour ces couches, on a pu mesurer grâce aux outils d'analyse d'images mis en œuvre une forte augmentation du volume de la phase fibreuse et une diminution du volume de la phase poreuse : l'hygroexpansion des fibres tend à combler l'espace poral. Ce phénomène est certainement très hétérogène et pourrait être expliqué par une hygroexpansion des fibres qui serait par exemple contrainte au

niveau des segments liés des fibres, c'est-à-dire les zones de contact entre fibres, tandis qu'elle serait libre au niveau des segments non liés, c'est-à-dire les zones des fibres situées entre deux contacts. Pour les couches de fraction fibreuse plus élevée ($\geq 38\%$ dans notre cas), la déformation $\langle\epsilon_{zz}\rangle$ est plus importante (de l'ordre de 2%). On a cependant pu mesurer une augmentation du volume de la phase fibreuse plus faible que dans les couches moins denses. Néanmoins, le gonflement des fibres est certainement ici plus homogène en raison de la fraction fibreuse élevée. Ceci entraîne une forte proportion de segments liés et une faible compensation de l'hygroexpansion des fibres par une décroissance du volume des pores. Pour l'étude complète, le lecteur pourra se référer à [8] et [9].

3.2 Champs de déplacement et de déformation d'une structure en carton ondulé sollicitée en compression

Les **figures 2(c) et 2(d)** donnent respectivement les cartes des composantes du champ de déplacement et des déformations moyennes en traction/compression et en cisaillement mesurées à la surface de panneaux d'une boîte en carton ondulé correspondant au maximum de force enregistrée au cours de la compression (**figure 2(a)**). Toutes ces composantes sont très hétérogènes. Parmi les phénomènes observés lors de la compression (**voir figures 2(b) et 2(c)**), celui de flambement révélé par la composante hors plan du panneau w du champ de déplacement, maximale au centre du panneau, voire nulle ou légèrement négative le long des arêtes, est prépondérant. La composante verticale v du champ de déplacement est importante, mais homogène sur la surface. Ceci met en évidence l'influence des panneaux voisins sur un phénomène de compression des rabats et d'écrasement des rainages horizontaux du panneau étudié. La variation de la composante horizontale u révèle que les arêtes verticales ne restent pas droites au cours de la compression et qu'elles tendent vers le centre du panneau. Cette configuration du panneau fait que les valeurs de déformations moyennes sont proches de zéro au centre du panneau et importantes, le long des arêtes verticales et horizontales. Les déformations moyennes et la représentation schématique de la direction et de l'intensité des déformations principales (fournies **figure 2(d)**) témoignent d'un fort état de déformation en compression et en cisaillement le long des arêtes horizontales dans le sens de la compression et le long des arêtes verticales dans le sens perpendiculaire

à la compression. Ces résultats contribuent à mettre en évidence la présence de contraintes de compression très importantes perpendiculairement au sens de la sollicita-

tion de la boîte le long des arêtes verticales lors du gerbage des emballages carton. Le lecteur pourra se référer à [8] et [10] pour l'étude complète.

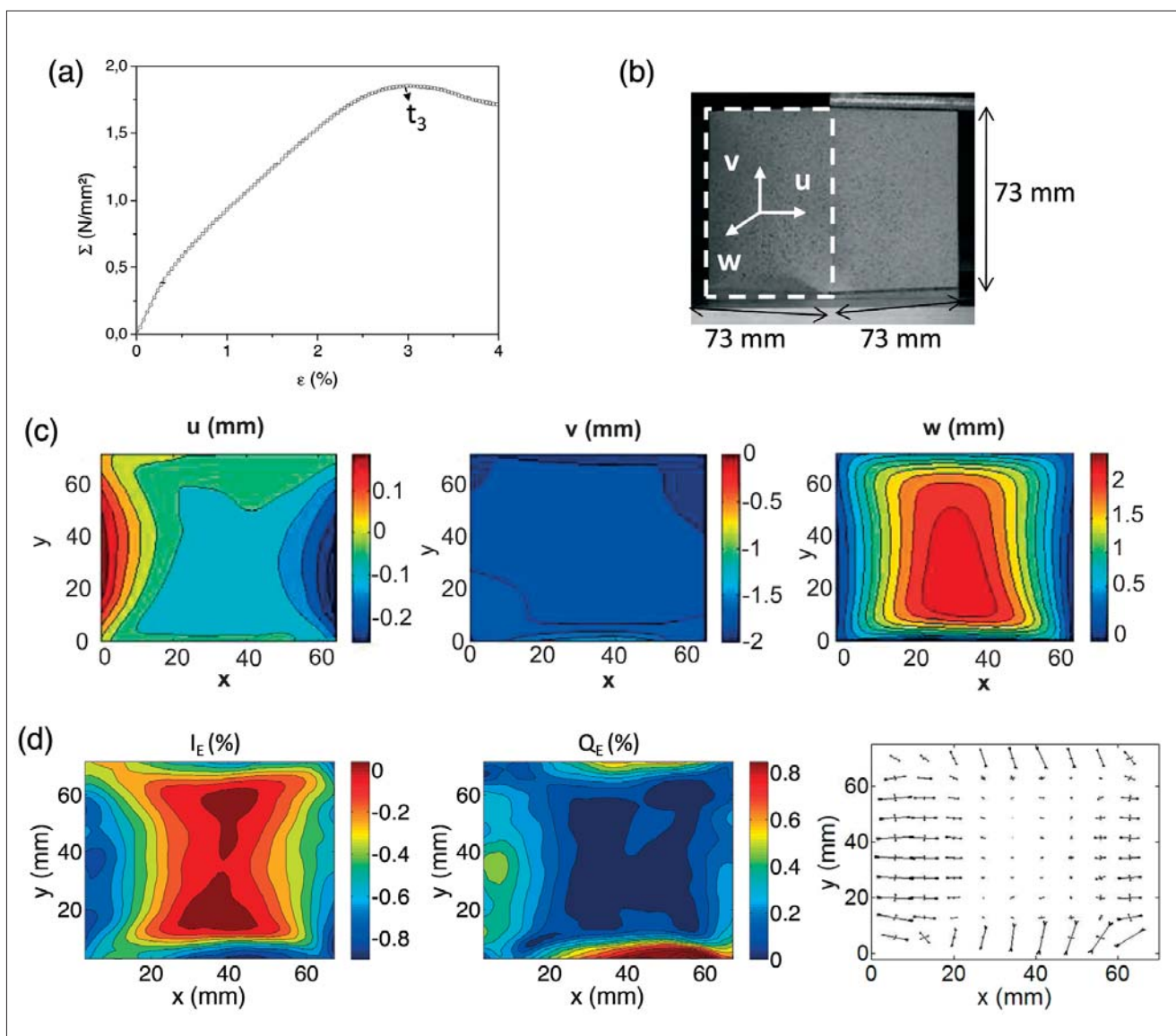


Figure 2 : (a) Courbe typique de compression d'une boîte : $\Sigma = F/S_0$ avec F la force de compression, S_0 la surface de la section du panneau, $\epsilon = \Delta/h_0$ avec h_0 la hauteur initiale de la boîte et h sa variation de hauteur. (b) Boîte en carton ondulé avec profil de cannelure G à la force de compression maximale enregistrée (point t_3 sur la courbe). Ses surfaces ont été recouvertes d'un mouchetis pour la stéréocorrélation d'images. (c) Composantes u , v et w du champ de déplacement d'un panneau (exprimé dans un repère local attaché à ce dernier). (d) I_E : déformation moyenne en traction/compression ou encore demi-variation surfacique relative, Q_E : déformation moyenne en cisaillement et représentation schématique de la direction et de l'intensité des déformations principales. Données correspondant à la force de compression maximale relevée au cours de la compression d'une boîte de 73 mm × 73 mm × 73 mm.

4 Conclusion

Les méthodes de corrélation d'images pour la mesure des champs de déplacement et de déformation dans le domaine des matériaux fibreux comme les papiers et cartons se révèlent très prometteuses. Couplées à la microtomographie à rayons X, elles permettent de progresser de manière inédite dans l'analyse des liens entre phénomènes d'hygroexpansion et agencement de la microstructure fibreuse.

À l'échelle macroscopique, appliquées à l'analyse du flambement d'emballages carton, elles fournissent un ensemble de données extrêmement riches et complètes, amenant une meilleure compréhension de l'influence de la structure des panneaux et de la géométrie des emballages.

Les connaissances obtenues grâce à l'exploitation de ces différentes techniques expérimentales ouvrent de nouvelles voies d'optimisation des propriétés, notamment hygromécaniques, des papiers et des cartons.

Remerciements

Ce travail a été réalisé en partie dans le cadre du Long Term Project ESRF "Heterogeneous Fibrous Materials" (exp. MA127).

Références

- [1] J. Viguié, P.J.J. Dumont, I. Desloges, E. Mauret, "Some experimental aspects of the compression behaviour of boxes made up of G-flute corrugated boards", *Packaging Technology and Science*, 2010, vol. 23, pp. 69-89.
- [2] S. Rolland du Roscoat, X. Thibault, J.-F. Bloch, "Synchrotron radiation microtomography applied to investigation of paper", *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2005, vol. 38, pp. A78-A84.
- [3] J.-N. Périe, S. Calloch, C. Cluzel, F. Hild, "Analysis of a multiaxial test on a c/c composite by using digital image correlation and a damage model", *Experimental Mechanics*, 2002, 42(3), 318-328.
- [4] J. Orteu, "3-d computer vision in experimental mechanics", *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, vol. 47, pp. 282-291.
- [5] A. Allansson, B. Svard, "Stability and collapse of corrugated board ; numerical and experimental analysis", Master's thesis, Division of Structural Mechanics, LTH, Lund University, 2001.
- [6] P. Vacher, S. Dumoulin, F. Morestin, S. Mguil-Touchal, "Bidimensional strain measurement using digital images", *Proceedings of the IMechE, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 1999, vol. 213, pp. 811-817.
- [7] L. Salmén, C. Fellers, 'The nature of volume hydroexpansivity of paper', *Journal of Pulp and Paper Science*, 1989, vol. 15(2), pp. 63-65.
- [8] J. Viguié, "Comportements mécanique et hygroexpansif des matériaux ligno-cellulosiques pour l'emballage rigide", PhD Thesis, Institut polytechnique de Grenoble (Grenoble INP), 2010.
- [9] J. Viguié, P.J.J. Dumont, E. Mauret, S. Rolland du Roscoat, P. Vacher, I. Desloges, J.-F. Bloch, "Analysis of the hygroexpansion of a lignocellulosic fibrous material by digital correlation of images obtained by X-ray synchrotron microtomography: application to a folding box board", *Journal of Materials Science*, 2011, vol. 46(14), pp. 4756-4769.
- [10] J. Viguié, P.J.J. Dumont, L. Orgéas, P. Vacher, I. Desloges, E. Mauret, "Surface stress and strain fields on compressed panels of corrugated board boxes. An experimental analysis by using Digital Image Stereocorrelation", online 10.1016/j.compstruct.2011.05.018 in *Composite Structures*.
- [11] L. Meunier, G. Chagnon, D. Favier, L. Orgéas, P. Vacher, "Mechanical experimental characterisation and numerical modelling of an unfilled silicone rubber", *Polymer Testing*, 2008, vol. 27, pp.765-777.
- [13] S. Rolland du Roscoat, M. Decain, X. Thibault, C. Geindreau, J.-F. Bloch, "Estimation of microstructural properties from synchrotron X-ray microtomography and determination of the REV in paper materials", *Acta Materialia*, 2007, vol. 55, pp. 2841-2850.