

CFA/VISHNO 2016

Impact normal d'une sphère creuse en plastique sur une couche plane en polymère: application au tennis de table

L. Manin^a, R. Rinaldi^b, C. Bonnard^a, A. Drillon^a, H. Lourenco^c et N. Havard^c

^aINSA-LYON LAMCOS, 18 rue des sciences, 69621 Villeurbanne, France

^bMATEIS- Insa Lyon, Bât. B. Pascal, 5^e étage - 7, avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France

^cCornilleau, 14 Route Nationale, 60121 Bonneuil-Les-Eaux, France, France
lionel.manin@insa-lyon.fr



LE MANS

Une raquette de tennis de table, en plus du bois se compose d'un revêtement en élastomères que viendra impacter la balle en condition de jeu. Cette étude se concentre sur l'influence des constituants polymériques du revêtement. La performance « rapidité » d'un revêtement est ici considérée et se quantifie en termes de coefficient de restitution CR, ratio entre les vitesses incidente et réfléchie de la balle impactant un support sous incidence normale. Mesures expérimentales et modélisation par Éléments Finis sont effectuées et confrontées. Des tests d'impact sous incidence normale sont effectués sur différents supports (rigide, mousse, mousse + compact de la gamme Cornilleau commercialisée) pour des vitesses incidentes comprises entre 10 et 30m/s. Les coefficients de restitution sont présentés en fonction de la vitesse incidente, les effets de la mousse, du revêtement sont identifiés. Un modèle E.F. 3D est programmé sous la forme d'un script Python pour abaqus©. Les lois de comportement de la balle, de la mousse et du compact associées en parallèle une série de Prony (identifiée via des mesures DMA) et une loi hyper-élastique de manière à prendre en compte, respectivement, les effets de vitesse et les grandes déformations mises en jeu lors de l'impact. La déformée obtenue lors de l'impact, montre que la zone de contact correspond à un anneau circulaire qui croît radialement avec l'enfoncement. De fait, la dissipation due au frottement est importante comme le montre les CR obtenus pour la mousse suivant que le contact soit considéré parfaitement glissant ou adhérent. De manière générale, les tendances identifiées expérimentalement sont parfaitement retranscrites par la simulation.

1 Introduction

Une raquette de tennis de table est un composé hybride multicouche comprenant deux couches de polymères collées sur une palette en bois contreplaqué. Les deux couches de polymère, une mousse élastomère et un caoutchouc architecturé appelé compact, forment le revêtement de la raquette (Fig. 1). L'impact balle/raquette peut en première analyse se ramener à l'impact normal d'une sphère creuse en plastique (celluloïd) sur un plan formé de deux couches polymériques superposées, le bois étant ici considéré rigide car on cherche à quantifier la performance du revêtement. Lors de l'impact balle/revêtement, ces deux constituants polymériques peuvent exhiber de grandes déformations dissipatives qui jouent un rôle clef dans la préservation de l'intégrité de la balle, ainsi que dans les performances au jeu de la raquette (contrôle et vitesse). L'amélioration des performances des revêtements de raquette de tennis de table passe ainsi par une compréhension et une modélisation du comportement.

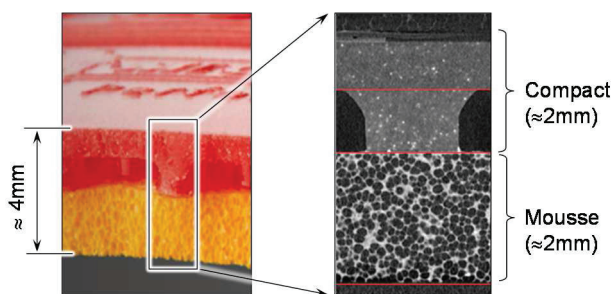


Figure 1: composition du revêtement d'une raquette de tennis de table : mousse et compact

Des tests d'impact normal pour la détermination de coefficients de restitution sont utilisés pour caractériser la performance de vitesse, objet de cette étude. Peu de travaux ont traité du comportement complexe des constituants de la raquette et de leurs réponses à un impact normal par une balle. Cependant, l'écrasement d'une sphère à paroi mince sur une surface plane a été étudié assez largement, et le flambage de la sphère a été mis en évidence aussi bien en quasi-statique qu'en dynamique [1-5]. Dans les travaux où une balle de tennis de table est utilisée, le matériau en celluloïd est considéré comme élasto-plastique [1] alors même que les polymères vitreux ont des comportements

viscoélasto-viscoplastique [6,7]. Ainsi, la dépendance à la vitesse de déformation du matériau celluloïd doit être pris en compte, plus particulièrement dans le cas d'impact et lorsque les propriétés sont mesurées en quasi-statique [4, 5]. Récemment, Zhang et al. [8] ont utilisé une méthode inverse pour décrire le comportement viscoélastique du matériau de la balle, puis ils ont modélisé l'impact sur une surface plane rigide, illustrant l'importance d'intégrer la dépendance à la vitesse de déformation.

Une modélisation fine du comportement nécessite de prendre en compte les propriétés viscoélastiques (dissipatives) de la balle et des constituants polymériques du revêtement. L'objectif de cette étude s'inscrit dans cette optique.

2 Tests d'impact normal

2.1 Préparation des échantillons

Un revêtement du commerce fabriqué par Cornilleau© est étudié. Un solvant (Xylène) a été utilisé pour séparer la mousse du compact. Des échantillons de 100 mm*100 mm sont ainsi découpés, puis mesurés et pesés pour obtenir leur densité absolue (ρ). Ces échantillons sont ensuite collés sur des plaques rigides au moyen de film adhésif double face utilisé pour coller les revêtements sur les bois des raquettes. Les balles utilisées ont aussi été mesurées et pesées afin de s'assurer de leur normalité.

2.2 Protocole et montage

La machine de Cornilleau©, dédiée à ce type d'essai a été utilisée. Un canon à balle projette les balles sur la plaque rigide supportant l'échantillon de mousse. La trajectoire de la balle est imposée normale à la plaque située à 260 mm de la sortie du canon. La vitesse initiale ainsi que la rotation de la balle sont contrôlées. Un appareil photo numérique couplé à un éclairage stroboscopique permet de capturer des images de la balle à intervalle de temps régulier, avant et après impact (Fig. 2). Des marquages sont réalisés, sur la cible (échantillon) pour localiser son centre, sur la balle pour vérifier que la rotation (spin) de la balle reste négligeable.

Les traces incidentes et réfléchies de la balle sont identifiées par post-traitement des images et les positions du centre de la balle sont déterminées à chaque instant t^k .

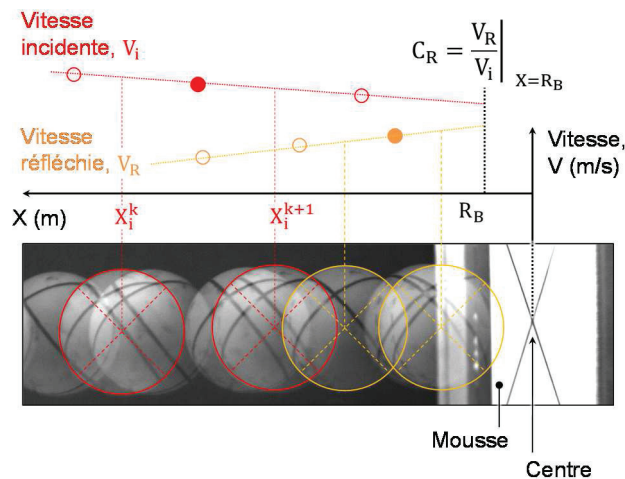


Figure 2: Traces de la balle lors de l'impact normal sur une mousse, principe de mesure du coefficient de restitution C_R .

L'intervalle de temps Δt entre chaque trace étant constant, il est alors facile de déterminer les vitesses aux différents instants connaissant les coordonnées du centre de la balle pour chacune des traces (Eq. 1).

$$\begin{cases} V_i^k = \frac{x_i^k - x_i^{k+1}}{\Delta t} \\ V_R^k = \frac{x_R^k - x_R^{k+1}}{\Delta t} \end{cases} \quad (1)$$

Les vitesses incidente et réfléchie juste avant et juste après l'impact sont déterminées par interpolation linéaire en considérant la position du centre de la balle à une distance de 20 mm (rayon de la balle, noté R_B) de la surface de contact. Le coefficient de restitution peut alors être calculé (Eq. 2).

$$C_R = \frac{V_R(X)}{V_i(X)} \Big|_{X=R_B} \quad (2)$$

Des tests d'impact ont été réalisés à température ambiante pour des vitesses initiales de 5 à 30 m/s, ce qui correspond aux conditions rencontrées en jeu. Vingt impacts consécutifs sont réalisés pour un couple (cible, vitesse initiale). Les dix premiers tirs permettent de « chauffer » la balle et l'échantillon impacté. Parmi les dix derniers tirs, trois images sont sélectionnées visuellement telles que :

- La rotation de la balle est négligeable, l'inverse est la cause de déviation d'une trajectoire normale au plan d'impact,
- La trajectoire est normale au plan d'impact, ceci est confirmé lorsque les centres des traces de balle incidente et réfléchie sont alignés sur une même droite,
- La zone de contact n'implique pas le plan de joint de la balle (ligne pointillée marquée sur la balle).

2.3 Coefficient de restitution

Pour une configuration d'impact et pour les 3 tests sélectionnés le coefficient de restitution est calculé à partir du protocole décrit précédemment et illustré Fig. 2. Les traces de balle incidente et réfléchie sont séparées en considérant que l'espace entre les traces est plus grand sur la trajectoire incidente que réfléchie puisque la vitesse décroît.

Le logiciel libre ImageJ© a été utilisé pour post-traiter les images et extraire les coordonnées du centre de la balle pour les différentes traces. La référence sur l'axe horizontal est la cible ($x_{cible} = 0$), l'intervalle de temps entre les traces $\Delta t = 1/f$ où f est la fréquence du stroboscope.

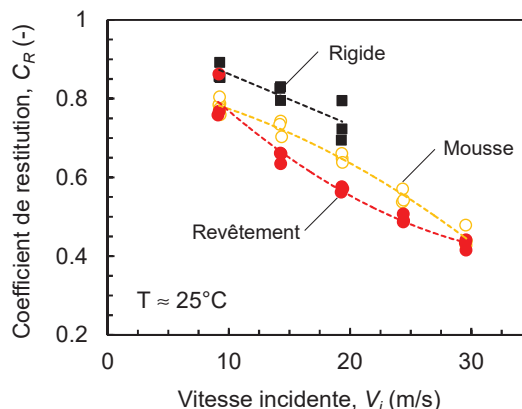


Figure 3: Mesures du coefficient de restitution pour un impact normal à la surface de contact en fonction de la vitesse incidente.

Les coefficients de restitutions mesurés sont représentés sur la Figure 3 en fonction de la vitesse incidente et pour trois surfaces impactées : surface rigide, échantillon de mousse collé sur la surface rigide, revêtement (mousse + compact) collé sur la surface rigide. Classiquement, on observe une décroissance du coefficient de restitution pour une augmentation de vitesse incidente. Pour une vitesse incidente donnée, les coefficients de restitution des trois cibles se classent comme ceci, ${}^R C_R > {}^M C_R > {}^{MC} C_R$ (les indices R , M et MC signifient Rigide, Mousse, Mousse+Compact respectivement). On remarque qu'à faible (10 m/s) et haute (30 m/s) vitesses, la différence entre une couche de mousse et une couche composée de la mousse et du compact est plus faible. Les résultats d'impact sur surface rigide sont similaires et ont les mêmes tendances que ceux publiés dans [8].

3 Modélisation

La modélisation du problème d'impact normal et la prise en compte des propriétés des polymères sont mises en œuvre par des simulations explicites par éléments finis 3D avec le logiciel abaqus© [9]. Les détails de modélisation de la balle, des polymères de la mousse et du compact sont explicités ci-après.

3.1 Comportement mécanique des composants polymères

Le nombre de constituants polymères à prendre en compte varie de un (balle) à trois (balle + mousse + compact) en fonction de la configuration de test considérée et modélisée. Des essais de calorimétrie différentielle à balayage ont confirmé que la balle est à l'état vitreux (${}^B T_g \approx 94^\circ\text{C} < T_{amb}$), alors que la mousse et le compact sont dans un état caoutchoutique (${}^M T_g \approx {}^C T_g \approx -60^\circ\text{C} < T_{amb}$). Etant donné que la balle retrouve sa forme originelle après l'impact, seule sa réponse viscoélastique est implémentée dans le modèle. Les matériaux caoutchoutiques sont souvent assimilés à des matériaux hyper-élastiques. Dans le cadre de notre étude et

les grandes vitesses de sollicitation mises en jeu, ces matériaux polymériques peuvent cependant évoluer vers leur état vitreux avec leurs modules de stockage et de perte qui augmentent [10]. Par conséquent, lors de l'impact, il faut rendre compte des propriétés jusqu'aux grandes déformations, et considérer l'influence de la vitesse de sollicitation.

Le comportement viscoélastique a été mesuré avec des tests d'analyse mécanique dynamique (DMA) réalisés sur une machine Eplexor®. Un chargement sinusoïdal forcé est appliqué aux fréquences 1, 5 et 25 Hz pour une plage de température de -50°C à 75°C avec une montée en température de 1°C/min. Pour la balle et la mousse, des petits échantillons en forme de bandes ont été sollicités en traction (Fig. 4). Pour le compact il n'a pas été possible de préparer de petits échantillons réguliers. Des échantillons de revêtements (mousse + compact) ont été préparés sous la forme de cylindre de 10mm de diamètre par poinçonnage (Fig. 5). Ces échantillons sont sollicités en compression dans l'épaisseur.

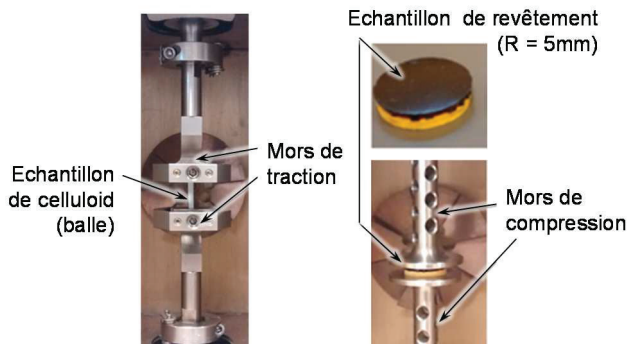


Figure 4: Analyse mécaniques dynamique (DMA). (a) Montage de caractérisation du celluloid de la balle. (b) Montage de caractérisation du revêtement et échantillon

Les résultats de ces mesures DMA sont présentés sur la Figure 6a&b où les évolutions des modules de stockage et des facteurs de perte sont tracés en fonction de la température. La Figure 6a montre l'effet de la fréquence de sollicitation. A température ambiante, la mousse reste dans son état caoutchoutique avec des faibles module et amortissement. Ces deux quantités augmentent avec la diminution de température à mesure que la transition vitreuse se rapproche. La Figure 6b montre les réponses à une sollicitation de 1hz. Dans la plage de température couverte, la matériau de la balle a un module élevé de 2GPa cohérent avec les résultats de [1,5], et un amortissement modéré (<0.1). Les systèmes constitués par la mousse seule et la mousse + compact ont des comportements similaires, par conséquent, dans la suite les propriétés viscoélastiques de la mousse seront utilisées pour modéliser aussi le compact.

Pour la réponse de la mousse aux grandes déformations, un test de compression en quasi statique a été réalisé sur une machine Zwick à température ambiante et à vitesse de déformation constante de 10⁻³/s. Des échantillons cylindriques de mousses avec un rapport longueur/diamètre de 1 ont été poinçonnés dans une couche de 2mm de mousse. La figure 7 montre la réponse non linéaire contrainte nominale – déformation nominale obtenue.

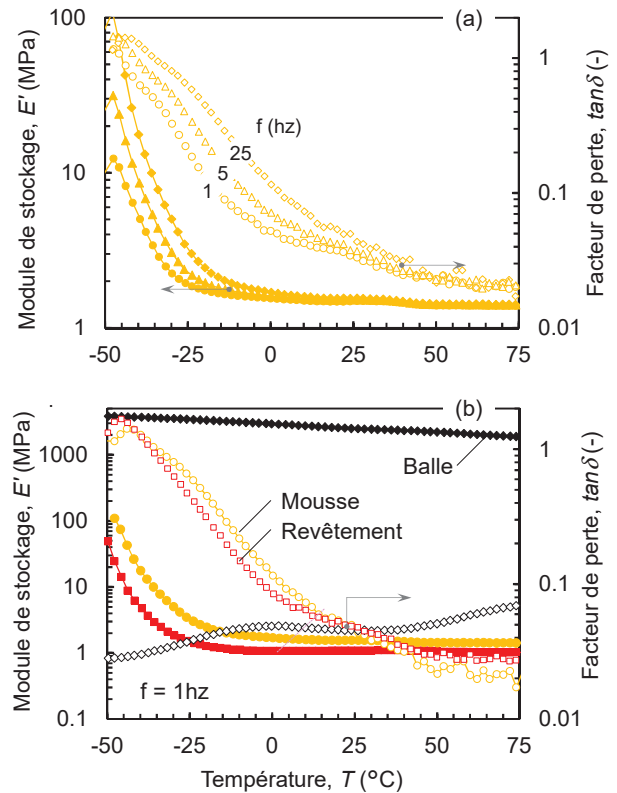


Figure 6: Caractéristiques viscoélastiques des constituants polymères. (a) effet de la fréquence et de la température sur la mousse. (b) effet de la température pour les trois constituants.

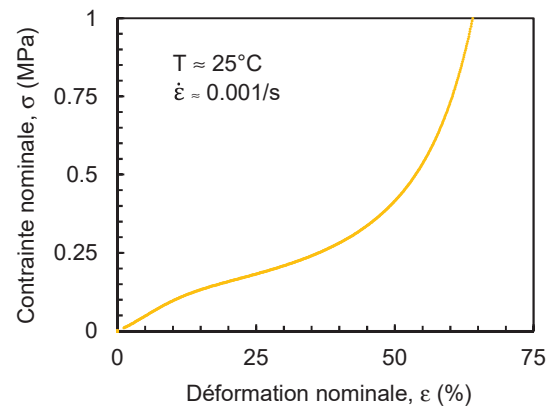


Figure 7: Réponse de la mousse aux grandes déformations.

3.2 Implémentation des lois de comportement dans la modélisation E.F

Avec le logiciel Abaqus®, les séries de Prony, aussi connues sous le nom de modèle de Maxwell généralisé (Fig.8), sont utilisées pour modéliser le module de cisaillement G(t) des matériaux viscoélastiques.

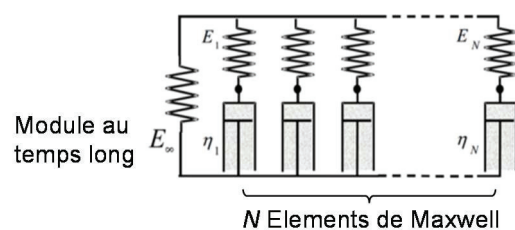


Figure 8: Eléments discrets de Maxwell, série de Prony.

Une présentation détaillée de la théorie et des paramètres à renseigner dans abaqus sont donnés dans [8]. Le module de cisaillement en fonction de la vitesse de déformation est déterminé à partir des tests DMA en appliquant la méthode décrite dans [12]. Neuf éléments discrets de Maxwell ont été identifiés pour la mousse et huit pour la balle. Ils sont listés dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Paramètres de Prony ($\tau_i = \eta_i/E_i$)

i	Mousse & picots		balle	
	E_i (-)	τ_i (s)	E_i (-)	τ_i (s)
1	0.250	8.3 E-7	0.055	1E-8
2	0.300	8.3 E-6	0.055	1E-6
3	0.360	8.3 E-5	0.055	1E-4
4	0.017	1.7 E-3	0.060	1E-2
5	0.005	2.1 E-2	0.065	1E-0
6	0.002	2.1 E-1	0.065	1E+2
7	0.006	8.3 E-1	0.060	1E+4
8	0.005	4.2 E+0	0.060	1E+6
9	0.004	2.1E+1	-	-
Modules au temps long				
E_∞ (MPa)	Hyperelastic		2000	

Des coefficients de Poisson constants sont utilisés afin de contrôler le comportement volumique. Des données tabulées issues de la courbe expérimentale contrainte-déformation sont utilisées pour la grande déformation à faible vitesse. Tel que précédemment évoqué, les propriétés viscoélastiques et aux grandes déformations de la mousse déterminées expérimentalement sont utilisées dans la modélisation pour la mousse et aussi le compact. Cependant, il persiste deux différences importantes entre ces constituants : la mousse étant modélisée comme un milieu continu, sa densité et son coefficient de Poisson sont différents de ceux du compact pour qui la géométrie exacte est modélisée (Fig. 8). Ainsi, des valeurs de matériaux presque incompressible sont utilisées pour le compact ($^C\nu=0.49$, $^C\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$), alors que les valeurs effectives mesurées sont utilisées pour la mousse ($^M\nu = 0.41$ déterminée par vidéo extensométrie, $^M\rho = 490 \text{ kg/m}^3$). Dans notre cas, la mousse est modélisée avec un modèle HYPERELASTIC contrairement aux mousses à faible densité dont les coefficients de Poisson tendent vers 0 [13] et qui sont modélisées avec une représentation HYPERFOAM.

La modélisation 3D par Eléments Finis de la balle impactant le compact + la mousse est illustrée Figure 8. Le rayon extérieur de la balle $R_B=20\text{mm}$, son épaisseur $e_B=0.39 \text{ mm}$. La longueur du côté du carré de compact + mousse est de 40mm, la mousse a une épaisseur $e_M=2\text{mm}$, le compact à

une épaisseur $e_C=1+1\text{mm}$ (planche + picot). Des éléments de coque SR4 à cinq points d'intégration suivant l'épaisseur sont utilisés pour modéliser la balle, les éléments C3D8R sont employés pour la mousse et le compact. La face inférieure de la mousse est fixe. Le contact entre les corps est défini comme Rough (rugueux) si non spécifié. La balle impacte la cible à une vitesse V_i . Enfin une pression interne constante est considérée tel que justifié dans [8].

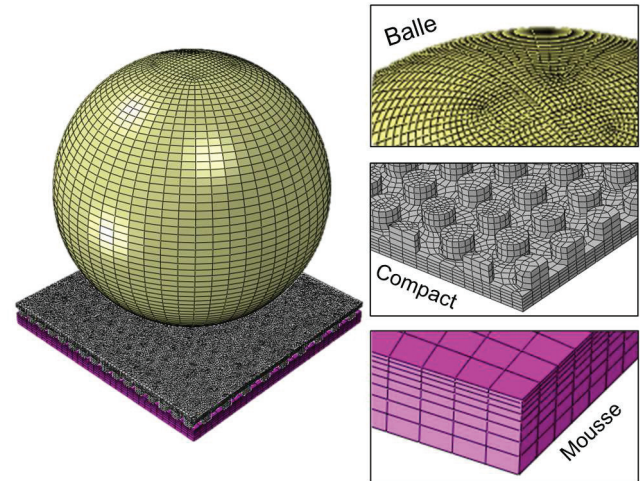


Figure 8: Modèle Eléments Finis 3D du système balle - compact - mousse.

4 Résultats

4.1 Prédiction des coefficients de restitution

Deux points de la balle sont considérés pour analyser l'impact (pt1 et pt2, Fig. 9). Le point B qui est sur le plan médian permet d'extraire la vitesse de la balle à tout instant de l'impact, le point A situé au sommet permet de déterminer le cloquage (flambage) observé pour la plupart des vitesses incidentes considérées.

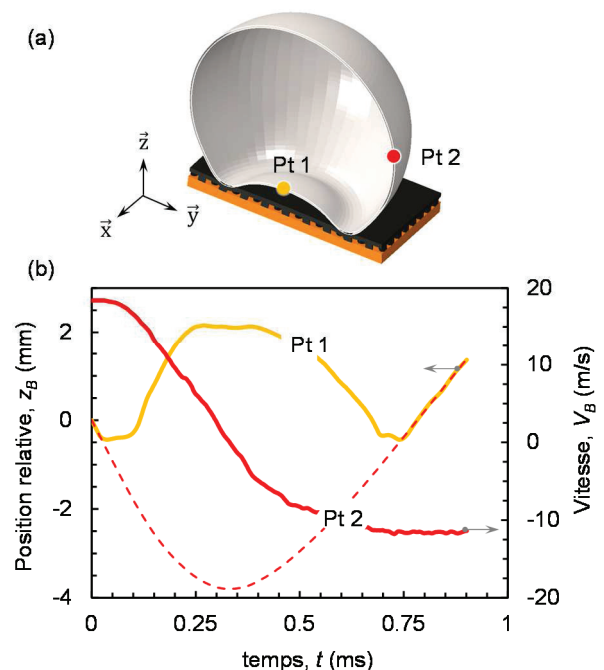


Figure 9 : (a) Déformée de la balle lors de l'impact, (b) Position selon l'axe z de Pt 1 et (Pt 2 - R_B), vitesse V_B (Pt 2).

On observe sur la Figure 9 qu'au maximum de cloquage, la vitesse passe par 0 puis le rebond commence. Le coefficient de restitution est déterminé en faisant le rapport des vitesses V_B (pt2) à la sortie du contact et à l'entrée.

La déformée obtenue lors de l'impact (Fig. 9 & 10), montre que la zone de contact correspond à un anneau circulaire qui croît radialement avec l'enfoncement.

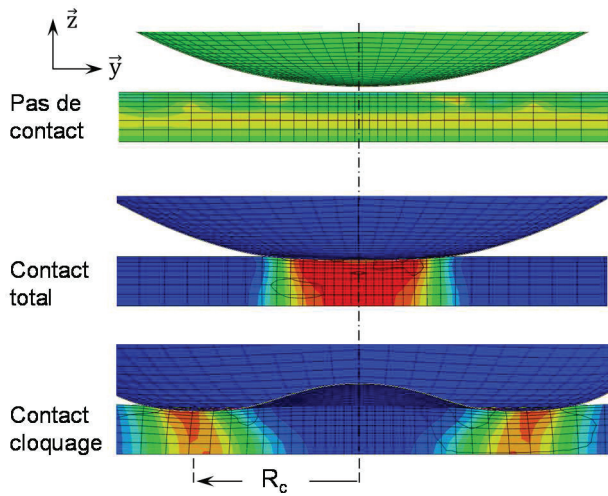


Figure 10 : Evolution du contact au cours de l'impact. Le code de couleur correspond aux contraintes selon l'axe vertical z (unités arbitraires).

De fait, la dissipation due au frottement est importante comme le montre les C_R obtenus pour la mousse suivant que le contact soit considéré parfaitement glissant ou adhérent (Figure 11b).

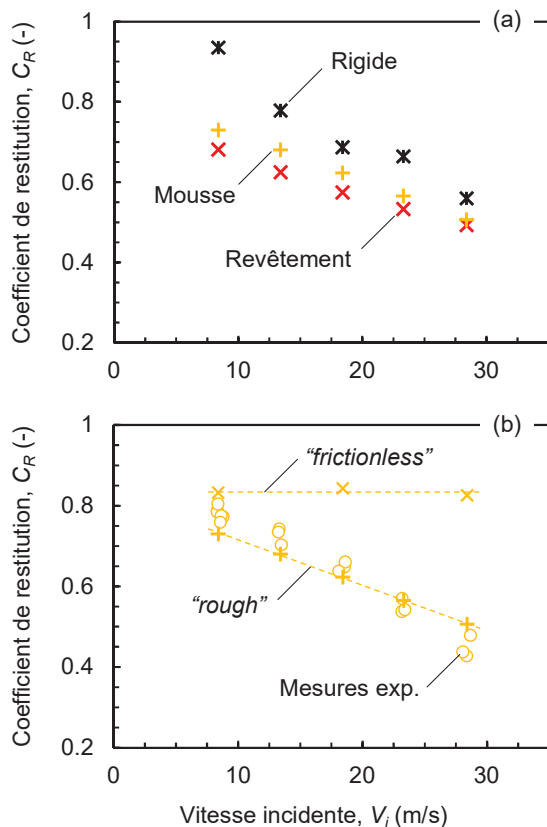


Figure 11 : (a) C_R calculés pour différentes vitesses incidentes et surfaces impactées. (b) Effet des conditions de contact sur le coefficient de restitution de la mousse pour différentes vitesses incidentes.

Les coefficients de restitution prédits par la simulation sont tracés en fonction de la vitesse incidente et pour les différentes surfaces impactées sur la Figure 11a. On retrouve les mêmes tendances que celle observées expérimentalement (Fig. 3), les valeurs calculées sont légèrement supérieures à celles mesurées.

La comparaison directe des coefficients de restitution prédits et mesurés pour l'impact d'une mousse seule est présentée Figure 11b. Il est à noter que pour une vitesse d'impact donnée, les 3 résultats expérimentaux sont présentés pour illustrer la dispersion des mesures expérimentales.

5 Conclusion

Les travaux présentés s'intéressent aux revêtements en polymère utilisés sur les raquettes de tennis de table. Leur performance évaluée à travers le coefficient de restitution lors de l'impact normal d'une balle a été étudiée. Des mesures sur banc d'essai dédié ont été réalisées. Une modélisation par éléments finis 3D a été développée, elle intègre les comportements viscoélastiques et donc dissipatif des constituants polymères. Les propriétés des matériaux ont été déterminées expérimentalement au moyen d'essais DMA et DSC. Les résultats de simulation mettent bien en évidence le cloquage de la balle ainsi que l'importance et l'effet des conditions de contacts utilisées dans le modèle E.F. La concordance avec les résultats expérimentaux est bonne et les tendances observées sont les mêmes.

Références

- [1] Ruan HH, Gao ZY, Yu TX. Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays. *Int J Mech Sci* 2006;48:117-133.
- [2] Shorter R, Smith JD, Coveney VA, Busfield JJC. Axial compression of hollow elastic spheres. *J Mech Mat Struc* 2010;5(5): 693-705.
- [3] Pauchard L, Rica S. Contact and compression of elastic spherical shells: the physics of a 'ping-pong' ball. *Philos Mag B* 2010;78(2): 225-233.
- [4] Zhang XW, Tao Z, Zhang QM. Experimental and Numerical Study on the Dynamic Buckling of Ping-pong Balls under Impact Loading. *Int J Nonlinear Sci Numer Simul* 2012;13:81-92.
- [5] Dong XL, Gao ZY, Yu TX. Dynamic crushing of thin-walled spheres: An experimental study. *Int J Impact Eng* 2008;35:717-726.
- [6] Rinaldi R, Gaertner R, Chazeau L, Gauthier C. Modeling of the mechanical behavior of amorphous glassy polymer based on the quasi-point defect theory—Part I: Uniaxial validation on polycarbonate. *Int J Non-Lin Mech* 2011;46(3):496-506.
- [7] Rinaldi R, Gaertner R, Brunet M, Chazeau L, Vidal-Sallé E, Gauthier C. Modeling of the mechanical behavior of amorphous glassy polymer based on the quasi-point defect theory—Part II: 3D formulation and

- finite element modeling of polycarbonate. *Int J Non-Linear Mech* 2011;46(3):507-518.
- [8] Zhang XW, Tao Z, Zhang QM. Dynamic behaviors of visco-elastic thin-walled spherical shells impact onto a rigid plate. *Latin Amer J Solids Struc* 2014;9(27):2607-2623.
- [9] Abaqus: <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
- [10] Rinaldi RG, Hsieh AJ, Boyce MC. Tunable microstructures and mechanical deformation in transparent poly(urethane urea)s. *J Polym Sci PartB: Polym Phys* 2011;49(2):123-135.
- [11] Lakes R. *Viscoelastic materials*. Cambridge University Press; 2009.
- [12] Cho H, Rinaldi RG, Boyce MC. Constitutive modeling of the rate-dependent resilient and dissipative large deformation behavior of a segmented copolymer polyurea. *Soft Matter* 2013;9(27):6319-6330.
- [13] Gibson LJ, Ashby MF *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge university press; 1997.