



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/authorsrights>

## Mesure du caractère absorbant ou restituitif des matériaux utilisés en podologie

Sarah BIZARRAGA-PIACENTINI<sup>a</sup>

Podologue diplômée

Sabrina COUTELLE<sup>a</sup>

Podologue diplômée

David BACQUART<sup>a</sup>

Maître-assistant, catégorie paramédicale

Pierre D'ANS<sup>a, b</sup>

Docteur et ingénieur civil, maître-assistant, catégorie paramédicale, chargé de recherche

Yves BUSEGNIES<sup>a</sup>

Docteur et licencié en physique, maître-assistant, catégorie paramédicale

<sup>a</sup>Haute École libre de Bruxelles - Ilya Prigogine (HELB), 808, route de Lennik, bâtiment P, 1070 Bruxelles, Belgique

<sup>b</sup>Université libre de Bruxelles (ULB), Service 4MAT, CP194/3, avenue Franklin D. Roosevelt, 50, 1050 Bruxelles, Belgique

\*Auteur correspondant.  
Adresse e-mail :  
pdans@ulb.ac.be  
(P. D'Ans).

**Afin de mesurer le caractère absorbant ou restituitif des matériaux utilisés en podologie un test accéléré mesurant le caractère restituitif d'orthèses fonctionnelles est proposé. Il distingue efficacement les coefficients de restitution ( $C_r$ ) d'élastomères propulseurs comme le Jogtene<sup>®</sup> ( $0,740\pm 0,010$ ) et le Dynatene<sup>®</sup> ( $0,774\pm 0,014$ ). Une réduction significative de  $C_r$  est également décelée pour un traitement thermique de 80 °C pour le Jogtene<sup>®</sup> et de 160 °C pour le Dynatene<sup>®</sup>. Les podologues veilleront donc à adapter les paramètres des traitements thermiques aux matériaux utilisés.**

© 2016 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés

*Mots clés* - absorption ; coefficient de restitution ; élastomère ; orthèse fonctionnelle ; polyuréthane cellulaire ; pressage à chaud ; traitement thermique

**Measuring the absorption or restitution property of the materials used in podiatry.** In order to measure the absorption or restitution property of the materials used in podiatry, an accelerated test measuring the restitutive character of functional orthoses has been designed. It makes an effective distinction between the coefficient of restitution ( $C_r$ ) of propulsion elastomers such as Jogtene<sup>®</sup> ( $0.740\pm 0.010$ ) and Dynatene<sup>®</sup> ( $0.774\pm 0.014$ ). A significant  $C_r$  reduction is also detected for a heat treatment of 80°C for Jogtene<sup>®</sup> and 160°C for Dynatene<sup>®</sup>. Podiatrists must therefore ensure that the heat treatment parameters are adapted to the materials used.

© 2016 Elsevier Masson SAS. All rights reserved

*Keywords* - absorption; cellular polyurethane; coefficient of restitution; elastomer; functional orthosis; heat treatment; thermoforming

Dans la pratique podologique, les orthèses plantaires sont généralement constituées de trois types de couches successives : une base en copolymère éthylène-acétate de vinyle (EVA), un squelette en résine et une couche de recouvrement. Ces matériaux sont généralement qualifiés en premier lieu par leur rigidité [1], exprimée par une dureté Shore. La dureté Shore n'est pas suffisante pour démontrer l'équivalence entre deux matériaux polymériques. On peut procéder à des tests mettant en jeu un banc d'essai et des patients, mais un tel test est plutôt indiqué pour évaluer un assemblage complexe de matériaux dans une orthèse [2].

Si l'on veut réellement démontrer l'équivalence de deux matériaux

en podologie, on doit plutôt considérer des propriétés telles que le comportement en fluage, la tenue à la fatigue, la rémanence, ou encore, la restitution d'énergie. Cette dernière, qui quantifie l'absorption des chocs par le matériau, peut être mesurée par des tests de rebond de billes métalliques sur une plaque du matériau [3]. L'analyse de ces rebonds donne accès au coefficient de restitution  $C_r$  des matériaux et des complexages. La définition retenue ici est le rapport des vitesses d'une bille rigide en chute libre sur le matériau, après et avant le choc, qui découle directement de la définition reprise par James L. Meriam et L. Glenn Kraige [4]. On peut également relier  $C_r$  à d'autres grandeurs plus souvent utilisées par les spécialistes

des matériaux, comme la "tangente des pertes" (souvent notée  $\tan$ ), ou encore, évaluer de façon systématique le comportement des polymères à haute température [5].

Un dispositif mesurant  $C_r$  est proposé ici pour des applications en podologie. Sa relative simplicité rend possible sa mise en œuvre au sein d'une école de podologie, auprès d'un public peu familiarisé avec la physique des matériaux. Lors de son fonctionnement, nous tentons de répondre aux questions suivantes :

- permet-il de discriminer quatre modèles de semelles fonctionnelles semi-rigides ?
- met-il en évidence une influence de la température du traitement thermique des orthèses sur leurs propriétés de rebond ?

## Matériel et méthodes

Les complexages testés sont composés d'un substrat BioFlux®, composite polycaprolactone-polyester, rigide, et du matériau à tester proprement dit, sélectionné parmi les suivants : Jogtene®, Dynatene®, Poron XRD® ou Memory 10® (Podiatech).

Les échantillons de la résine BioFlux®, d'une épaisseur de 1,7 mm, sont découpés en rectangles de 7 cm sur 8 cm. La résine est chauffée à une température de 70 °C durant 3 minutes, puis elle est pressée sur un carreau en plâtre de moulage, pour reproduire les conditions habituelles de pressage de ce type de résine.

Une seringue graduée et une spatule sont ensuite utilisées pour étaler uniformément 5 mL de colle sur une face de la résine.

Les échantillons des matériaux testés mesurent 5,5 cm sur 5 cm, pour une épaisseur de 3 mm, car c'était la seule épaisseur commune aux produits étudiés. Concernant le Jogtene® et le Dynatene®, c'est la face non lisse (opposée à la peau) qui a été encollée et ce, avec 3 mL de colle. Trente exemplaires à usage unique sont réalisés.

Pour étudier l'influence de la température de traitement, les complexages sont soit non traités, soit exposés 3 minutes à 80 °C ou 160 °C, pour reproduire la pratique podologique.

Le dispositif permettant la mesure du coefficient de restitution est présenté à la figure 1. Il se compose d'un cylindre vertical en PVC, dans lequel chute la bille en métal sur une hauteur maintenue constante. Le cylindre, qui permet de protéger l'expérience des perturbations de l'air ambiant, peut être relevé entre deux essais, pour remplacer le complexage. Un microphone enregistre les impacts de la bille sur le complexage. Il est relié à un ordinateur équipé du logiciel Audacity®, qui acquiert des sonagrammes, et grâce auquel l'intervalle de temps entre deux

rebonds de la bille est mesuré. Si  $\Delta t_i$  représente le  $i^{\text{e}}$  intervalle de temps entre deux rebonds, et si  $\Delta t_c$  est le temps nécessaire à la chute initiale de la bille, il est possible de montrer, par bilan de l'énergie mécanique des rebonds, que  $\log \Delta t_i = i \log C_r + \log(2\Delta t_c)$ , moyennant les hypothèses suivantes :

- la bille n'est pas en rotation sur elle-même ;
- les forces de frottement et la poussée d'Archimède sont négligées devant la gravité.

Le coefficient de restitution est extrait en portant  $\log \Delta t_i$  en fonction de  $i$ , en calculant la pente  $m$  de la droite de régression et en effectuant :  $C_r = 10^m$ . Grâce aux 30 mesures, les intervalles de confiance à 95 % sur  $m$  et sur  $C_r$ ,  $\Delta m$  et  $\Delta C_r$ , sont calculés, après vérification de la normalité.

## Résultats et discussion

Un exemple de droite de régression utilisée pour la détermination de  $C_r$  est donné à la figure 2. La linéarité est clairement vérifiée. La répétition de l'expérience montre que la valeur de  $C_r$  de ce matériau est  $0,740 \pm 0,010$ , en l'absence de traitement thermique (assemblage à 25 °C, température du laboratoire).

♦ **L'influence de la température de traitement** est donnée à la figure 3, pour deux des matériaux. Le Jogtene® apparaît plus absorbant que le Dynatene®, ce qui montre la capacité à distinguer ces deux élastomères propulsifs.

Le traitement thermique augmente le caractère absorbant des deux matériaux, mais cette modification semble se manifester de façon légèrement différente. Dans le cas du Dynatene®, la différence de  $C_r$  en l'absence de traitement et en cas de traitement à 80 °C n'est pas significative (0,77 et 0,76, respectivement). Les intervalles de confiance se chevauchent et un test de Fisher confirme le caractère peu significatif de la différence. Par

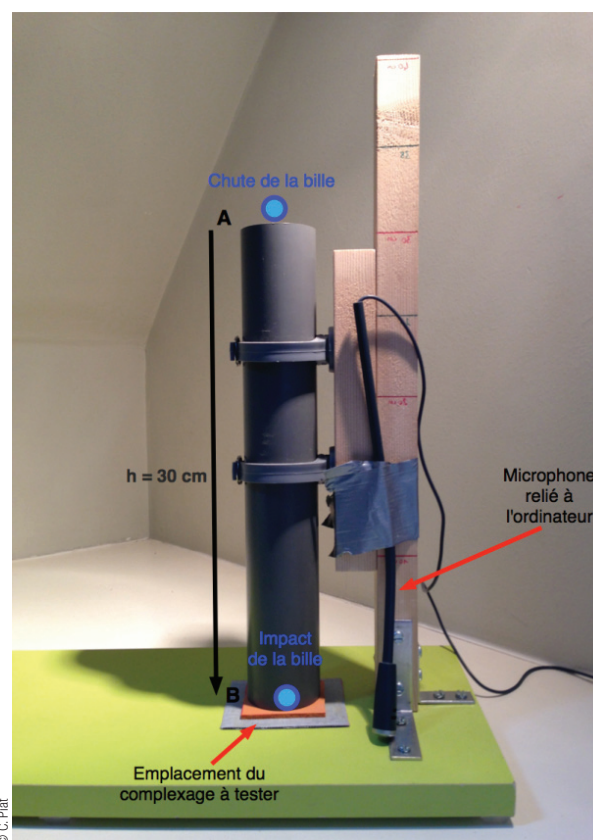


Figure 1. Montage expérimental.

contre, une dégradation significative de  $C_r$  est observée si le matériau est porté à 160 °C.

À l'inverse, dans le cas du Jogtene®, une chute significative de  $C_r$  se produit dès 80 °C.

Ces faits ne peuvent être ignorés par le praticien, qui a tendance à ne pas adapter les paramètres du traitement aux matériaux utilisés, alors que ceux-ci diffèrent par leur nature chimique et, donc, par leurs températures de transition vitreuse et de dégradation. Si, dans le cas du Dynatene®, les résultats semblent conformes aux préconisations du fabricant (température maximale d'utilisation annoncée : 100 °C) [6], ils interpellent particulièrement dans le cas du Jogtene®, qui est pourtant présenté comme non dégradé jusqu'à 160 °C [7].

♦ **Concernant le Poron XRD® et**

## Références

- [1] Legagneux P. Cahier des charges des orthèses plantaires. *Revue du Podologue*. 2014;10(56):29-30.
- [2] Berger L. Effets des orthèses plantaires thermoformées sur la marche. *Revue du Podologue*. 2010;6(31):20-1.
- [3] Lavaux G. À la recherche de la mousse perdue. *Revue du Podologue*. 2010;6(36):22-4.
- [4] Meriam JL, Kraige LG. *Engineering Mechanics, Vol. 2: Dynamics*. Hoboken (NJ): Wiley; 2012. p. 218.
- [5] Calvit HH. Experiments on rebound of steel balls from blocks of polymer. *J Mech Phys Solids*. 1967;15:141-50.
- [6] Podiatech. Matériau technique : Dynatene® (fiche technique). 2015.
- [7] Podiatech. Matériau technique : Jogtene® (fiche technique). 2015.

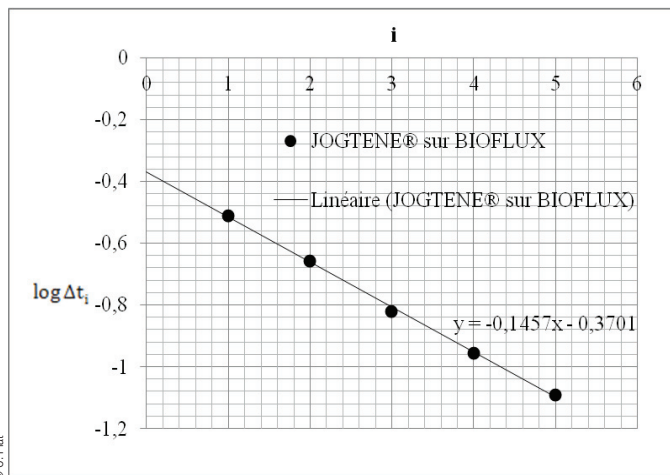


Figure 2. Droite de régression utilisée pour l'évaluation de  $C_r$  pour le complexage Jogtene® sur BioFlux® non traité.

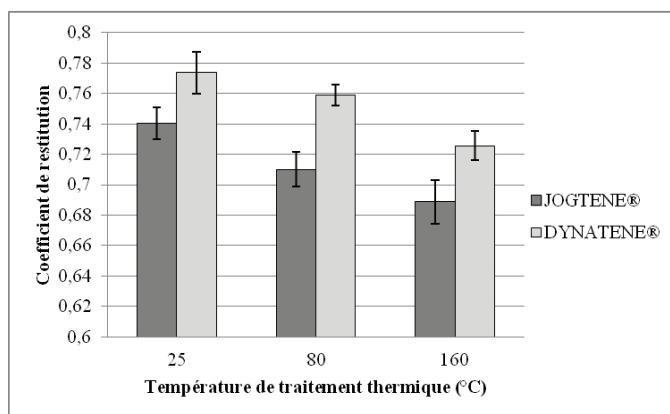


Figure 3. Relation entre la température de traitement thermique et le coefficient de restitution, pour le Jogtene® et le Dynatene®.

le Memory 10®, seuls deux impacts sont enregistrés : il n'est donc pas possible de tracer des droites telles qu'à la figure 2.  $\Delta t_i$  prend une valeur nettement plus faible que pour les matériaux précédents. Le premier point de la figure 2 (Jogtene®) correspond à un intervalle de temps de 0,308 s. Cette valeur n'est ici que de 0,133 s et de 0,155 s, respectivement pour le Poron XRD® et le Memory 10®.

L'ordonnée à l'origine  $\log(2\Delta t_i)$  étant théoriquement identique pour tous les matériaux (mais entachée d'une incertitude élevée, le lâcher de bille étant réalisé manuellement), on peut donner un ordre de grandeur

du coefficient de restitution, basé sur cette ordonnée à l'origine, et la moyenne des  $\Delta t_i$ . On trouve environ 0,3 pour le Poron XRD® et 0,35 pour le Memory 10®, sans garantie du caractère significatif de la différence. Ces matériaux, des polyuréthanes cellulaires, sont réputés absorbants, ce que le test fait bien ressortir.

## Conclusion

Le test proposé permet bien de mesurer le coefficient de restitution des matériaux utilisés dans les orthèses. Sa sensibilité élevée autorise les conclusions suivantes : dans les matériaux propulseurs, le Dynatene® est plus restituitif que le

Jogtene® ; le post-traitement thermique réduit significativement ce caractère et ce, dès 80 °C dans le cas du Jogtene®.

Le podologue sera donc particulièrement attentif au réglage de son four lors de l'utilisation de ces produits. Pour une utilisation optimale permettant la sauvegarde des caractéristiques techniques des matériaux étudiés, le podologue devra les employer avec un apport minimal de chaleur, voire sans chauffage.

Les matériaux plus absorbants ne sont pas encore correctement évalués à ce stade et le test, moyennant une hypothèse grossière, ne permet que d'approcher un ordre de grandeur de  $C_r$ .

Par ailleurs, la restitution de l'énergie dans les orthèses ne peut s'étudier à la lumière du seul matériau au contact du pied : elle est aussi fonction des matériaux sous-jacents, voire du sol.

Ce travail offre donc les perspectives suivantes : une modification du protocole permettant d'englober les matériaux aux  $C_r$  inférieurs à 0,5 ; la création d'un inventaire aussi homogène que possible de  $C_r$  en vue d'informer la profession de façon objective sur ses choix de matériaux et de traitements thermiques ; une étude systématique de l'influence des épaisseurs des différentes couches et de leur nature sur les propriétés absorbantes globales d'une orthèse, voire d'une chaussure. ▀