

Introduction

Le plongeur olympique est une discipline de saut nautique caractérisée par plusieurs catégories. Les plongeurs en avant ou renversés (départ avant puis rotation arrière) peuvent être précédés par une course d'élan et donc différents points d'appui du plongeur. Les plongeurs en arrière et retournés (départ arrière puis rotation avant) doivent être exécutés sans élan et donc sans décoller des pieds du plongoir avant le saut. Dans les différents cas, les plongeurs à la liberté d'ajuster le fulcrum (fonction de leur poids), l'objectif étant de réaliser un saut esthétique équilibré dont la hauteur est maximisée.

Le plongoir (hauteur 3m ou 10m), généralement en aluminium, est fixé par charnières (liaison pivot) à une extrémité avec un point d'appui ajustable appelé fulcrum. Ce dernier est à distance minimum de 1,88 m de l'extrémité. Il est réglable à une échelle allant de 1 à 9, 1 correspondant à l'état de raideur maximal de la planche et 9 à son état de raideur minimal.

Problématique mécanique du saut

Le principe mécanique du saut repose sur un transfert d'énergie élastique entre le plongoir (ressort dont la raideur est réglable grâce au fulcrum), et le plongeur. Alors que certains plongeurs placent le fulcrum en position de raideur minimal, d'autres préfèrent préserver une raideur intermédiaire afin de pouvoir contrôler et maintenir leur équilibre durant le saut. Le but de ce projet est de savoir comment déterminer la position optimale du fulcrum susceptible de permettre à un plongeur d'une masse donnée, d'atteindre un optimum, à savoir une hauteur maximale de saut avec un minimum d'énergie mécanique restituée par le plongoir.

D'un point de vue mécanique il est nécessaire d'étudier la résonance du ressort correspondant à la planche doit être en harmonie avec le mouvement du plongeur pour permettre au plongeur d'atteindre une hauteur et une vitesse maximales tout en lui permettant de réaliser ses figures correctement et avec un temps suffisant ;

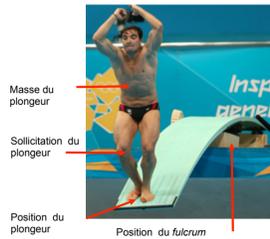


FIGURE: Un plongeur aux jeux Olympiques d'été de Rio 2016

Les verrous scientifiques correspondent donc :

- à la représentation du corps humain et de l'effort qu'il engendre, ainsi un modèle mécanique de plongeur non linéaire géométriquement devra être formulé.
- à l'interface entre le plongeur et le plongoir et entre le plongoir et le fulcrum devra être traité grâce à des lois de contact.

Développement d'un modèle de plongeur

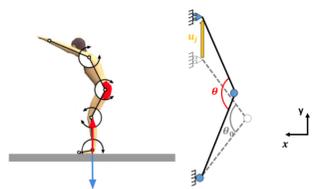


FIGURE: Principe des moments d'activations sur le plongeur et élément fini plongeur

L'élément plongeur présenté par la figure ci-contre est inspiré du modèle de [Cheng et al., 2005] et a été formulé dans le cadre de la méthode des éléments finis.

L'élément plongeur est composé de 2 noeuds, et d'une seule articulation. L'articulation est composée d'un ressort en rotation de raideur k_θ (dont une valeur est donnée dans [King et al., 2006]) et d'un moment externe pour contrer le poids propre et activer la sollicitation.

Il existe une relation cinématique avec le ddl interne θ tel que $\theta = 2 \arcsin\left(\frac{u_j - u_i}{2l} + \sin\frac{\theta_0}{2}\right)$. La forme faible de l'équilibre (PPV*) est : $\mathcal{P}_{int}^* = \mathcal{P}_{ext}^* \Leftrightarrow \theta^* k_\theta \theta = u_i^* F_i + u_j^* F_j$

D'où le vecteur force résistante devient :

$$\begin{bmatrix} F_i \\ F_j \end{bmatrix} = \frac{k_\theta}{l \sqrt{1 - \left(\frac{u_j - u_i}{2l} + \sin\frac{\theta_0}{2}\right)^2}} \left(2 \arcsin\left(\frac{u_j - u_i}{2l} + \sin\frac{\theta_0}{2}\right) - \theta_0 \right) \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

La matrice de raideur découle d'une simple dérivation du vecteur précédent de manière analytique.

Cet élément non linéaire est utilisé dans un code aux éléments finis classique avec un schéma de résolution temporel de Newmark et un algorithme de résolution non linéaire de Newton-Raphson.

Activation du plongeur

Le moment externe à appliquer sur le genou du plongeur a été étudié par [King et al., 2002, 2006] mais aussi par [Cheng et al., 2005] par :

$$M_{ext} = T_{max} A(t) f(\theta) h(\dot{\theta}) \quad (2)$$

avec :

- T_{max} : Moment maximal pouvant être généré par le plongeur au niveau de l'articulation
- t : Temps
- $f(\theta)$: fonction variant en fonction de l'angle d'ouverture au niveau du genou (précédemment définie)
- $h(\dot{\theta})$: fonction variant en fonction de la vitesse de rotation au niveau du genou (précédemment définie)
- $A(t)$: fonction d'activation du muscle du plongeur

Cette dernière fonction, telle qu'elle a été définie dans le modèle [Cheng, et al., 2005] est celle se rapprochant le plus du comportement réel des articulations humaines. Variant entre 0 et 1, celle-ci prend en considération les différentes phases musculaires lors d'un saut et traduit la stratégie de coordination du mouvement du plongeur.

Modèle numérique de la planche

Différents modèles de plongoirs en interaction avec un plongeur existent dans la littérature comme par exemple des systèmes masses ressorts [Boda et al., 1992]. Le modèle de plongoir est composé d'éléments de poutres de Bernoulli, dans le plan. Il est assimilé à une poutre continue articulée d'un côté et simplement appuyé de manière unilatérale sur le fulcrum (à une distance l_1). Aucun amortissement numérique n'est pris en compte dans le plongoir.

Les propriétés géométriques et physiques suivantes ont été retenues pour la modélisation du plongoir tout au long de ce projet :

Longueur	5m
Largeur	0.498m
Épaisseur	0.04 m
Masse volumique	1200 kg/m ³
Module de Young	70GPa

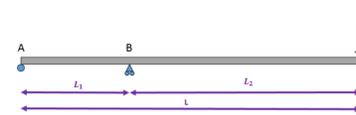


FIGURE: Modèle poutre du plongoir

20 éléments poutre de Timoshenko élastiques et linéaires sont utilisés pour la modélisation de la planche. Un élément permettant de gérer le contact unilatéral au niveau du fulcrum et au niveau de l'extrémité de la poutre en contact avec le plongeur sont utilisés.

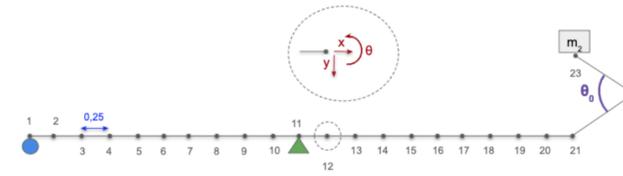


FIGURE: Maillage élément finis du plongoir et de l'élément plongeur

L'analyse modale du système {Poutre + Plongeur} permet de déterminer une première fréquence propre de 1.08Hz. La fréquence propre de la planche seule est de 4.88Hz.

Références

Cheng, Kuangyou B., et Mont Hubbard. «Optimal compliant-surface jumping :a multi-segment model of springboard standing jumps». Journal of BIOMECHANICS, n 38 (2005) : 1822-1829.ref2
Boda Wanda Lynn, "Modelling the springboard and diver as an oscillating spring system", University of Massachusetts, 1992,24
King, M.A. and Yeadon, M.R., 2002. Determining subject specific torque parameters for use in a torque driven simulation model of dynamic jumping. Journal of Applied Biomechanics, 18 (3), pp. 207-217.
King, M.A., Wilson, C. and Yeadon, M.R., 2006. Evaluation of a torque-driven model of jumping for height. Journal of Applied Biomechanics, 22 (4), pp.264-274.

Résultats

Deux phases majeures peuvent être distinguées lors d'un saut :

- Une première phase de pompage : Le plongeur sollicite le plongoir à travers une seule ou plusieurs oscillations périodiques. Lors de cette phase, le contact entre le plongeur et le plongoir peut être maintenu comme il peut être perdu néanmoins sans décollage final. À ce stade de la modélisation, des conditions fixant le déroulement de cette phase n'ont pas été imposées, l'activation du saut est auto-gérée et donc ne permet pas d'imposer une phase de pompage fixe.
- Une seconde phase de décollage : La phase de décollage final se déroule de la même manière lors de l'ensemble des simulations réalisées. Lorsque l'effort appliqué est suffisamment fort, le dernier appui du plongeur marque le dernier contact, durant la simulation, entre le plongeur et le plongoir.

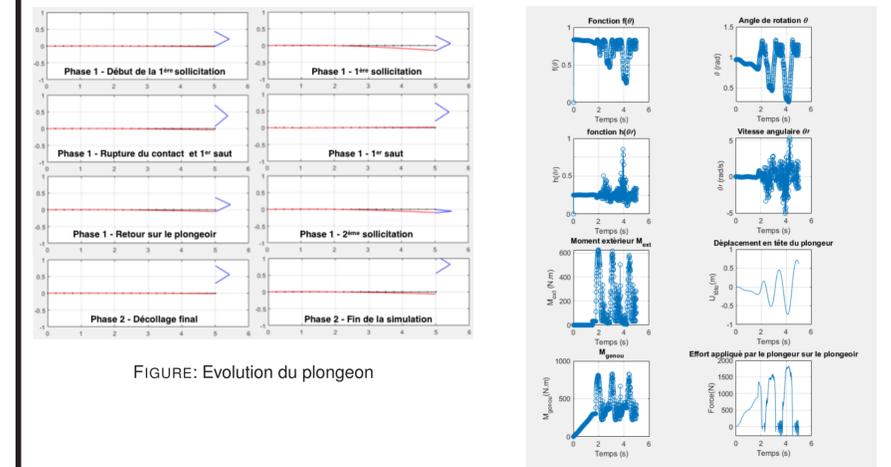


FIGURE: Evolution du plongeur

FIGURE: Résultats activation

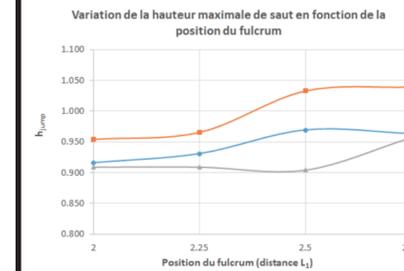


FIGURE: Variation de la hauteur de saut en fonction de la position du fulcrum

Le décollage final nécessite une phase de pompage composé de deux sauts. Les déplacements en tête du plongeur relevés sont plus importants que ceux observés lors de l'application des précédentes variantes. Néanmoins, ceux-ci semblent toujours faibles par rapport à ce qui est observé dans la réalité.

Les hauteurs de saut augmentent lorsque la masse du plongeur diminue. De plus, la raideur du plongoir doit être augmentée lorsque la masse du plongeur est plus importante. Cela revient donc à dire qu'un plongeur de 80 kg devrait régler le fulcrum au niveau 3 alors qu'un plongeur de 90 kg au niveau 1.

Quelques réserves sont néanmoins à émettre par rapport à cette étude paramétrique : comme il est possible de l'observer sur la figure, les hauteurs de saut obtenues par les différentes modélisations semblent être faibles par rapport aux résultats bibliographiques ($h_{jump} \in [1.52m, 1.60m]$).

Conclusion et perspectives

Cette étude traite de la modélisation du système {plongoir + plongeur} dans le cadre de la méthode des éléments finis. Les premiers résultats obtenus montrent que le moment d'activation appliqué au niveau du genou doit être amélioré pour reproduire au mieux le comportement réel du système. Des essais sur une balance 6 axes de l'ENS Lyon ont été effectués et doivent permettre de mieux appréhender l'impulsion réelle. Par ailleurs, un élément plongeur avec prise en compte des chevilles et du genou est en cours de développement afin de reproduire les différentes phases de l'impulsion.