

## Modélisation discrète des mouvements de foule. Application à l'interaction foule-structure

P. Pécol<sup>1</sup>, S. Dal Pont<sup>2</sup>, S. Erlicher<sup>3</sup>, P. Argoul<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Navier, Université Paris-Est, École des Ponts - ParisTech, France, {philippe.pecol,pierre.argoul}@enpc.fr

<sup>2</sup> Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Université Paris-Est, LCPC-BCC, France, dalpont@lcp.fr

<sup>3</sup> IOSIS Industries, France, silvano.erlicher@enpc.fr

**Résumé** — La modélisation des mouvements de foule et du chargement induit sur les ouvrages d'art est un problème émergent dans le domaine du génie civil. Développer un modèle de mouvement de foule pour simuler l'évacuation d'un lieu public de moyenne ou forte affluence devient utile voire nécessaire afin que les futures constructions ou aménagements publics puissent offrir une qualité de sécurité optimale à leurs usagers. La connaissance du comportement des piétons devient alors primordiale pour qualifier le niveau de services des différentes structures. Les effets des piétons sur les structures du génie civil, comme l'interaction dynamique foule-structure, doivent aussi être prises en compte et modélisées. Les structures telles que les passerelles piétonnes, qui oscillent à cause du passage d'un groupe de personnes, ou les gradins des stades ou salles de concert, qui vibrent à cause du mouvement rythmé du public, sont particulièrement concernées. Pour se rendre compte de l'importance de la modélisation de ce type de phénomène, il suffit de rappeler que plusieurs passerelles, construites récemment selon des critères architecturaux d'élancement et de légèreté, telles que la passerelle du Millénium à Londres et la passerelle de Solférino à Paris, se sont montrées sensibles à l'excitation induite par le passage de piétons. Plusieurs campagnes de mesures expérimentales ont permis de mieux comprendre ce phénomène : la foule se déplaçant sur une passerelle lui impose une excitation latérale qui a une fréquence proche de 1Hz. Lorsqu'un mode latéral de vibration du pont, souvent le premier, a une fréquence proche de cette valeur, un phénomène de résonance est activé entraînant l'augmentation de l'amplitude des oscillations de la passerelle. Si le nombre de piétons est faible, l'amplitude d'oscillation reste petite et les piétons continuent à marcher comme ils le feraient sur un plancher rigide. Par contre, si ce nombre dépasse un certain nombre critique, l'amplitude d'oscillation devient suffisamment grande pour que les piétons soient incités à changer leur manière de marcher afin de conserver leur équilibre, notamment leur fréquence de marche, jusqu'au moment où il y a synchronisation en fréquence entre piétons et structure. La densité de la foule est un autre facteur influençant le comportement du piéton. En effet, pour une foule de faible densité, chaque individu peut marcher librement comme s'il était seul. Au contraire, si la densité de la foule est élevée, chaque piéton a une marche contrainte par son entourage qui l'oblige à marcher au même rythme que les autres. Cette synchronisation piéton-piéton existe aussi sur sol rigide. Actuellement, très peu d'études prennent en compte ces deux types de synchronisation simultanément. L'objectif de notre étude est double : modéliser le mouvement des piétons en considérant les interactions locales piéton-piéton et piéton-obstacle, et y inclure un couplage piéton-structure. Ce modèle 2D discret devra être capable de traiter les problèmes d'évacuation de stades, salles de concert, etc., ainsi que les problèmes de synchronisation entre piéton-structure.

Depuis une cinquantaine d'années, de nombreuses études ont été réalisées pour décrire le comportement des piétons. Des modèles de mouvement de foule ont été développés pour reproduire certains phénomènes de foule tels que les évacuations de bâtiments. Les modèles de foule de la littérature peuvent être classés en deux grandes catégories selon le mode de représentation des piétons : les modèles dits "macroscopiques" où la foule est représentée dans son ensemble [2], et les modèles dits "microscopiques" [7] où les comportements, les actions et les décisions de chaque piéton sont traités individuellement. Dans ce papier, nous proposons un modèle microscopique de mouvement de foule : nous cherchons à étendre la modélisation des mouvements de grains à l'étude des mouvements de foule. Pour être considérée comme un piéton, une particule doit avoir une volonté de se déplacer vers un lieu donné. Cette volonté peut être modifiée au cours du temps. Ainsi, nous avons adapté les modèles granulaires afin de représenter les

mouvements de foule.

Nous avons étudié et implémenté dans l'environnement MATLAB, le modèle granulaire proposé par Frémond [5, 6, 3], et inspiré des travaux de Moreau [9]. Ce modèle entre dans un cadre thermodynamique rigoureux dans lequel les interactions locales sont gérées par l'utilisation de pseudo-potentiels de dissipation, et dans lequel les collisions entre particules peuvent être élastiques ou inélastiques. Nous avons ensuite adapté ce modèle à la foule en introduisant des forces sociales ainsi que des directions/vitesses souhaitées pour simuler le comportement des piétons [7, 10, 11]. Nous avons choisi la stratégie du chemin le plus court pour qu'un piéton se déplace d'un lieu à un autre. Cette stratégie a été implémentée à l'aide d'un algorithme de fast marching [8] et utilisée pour obtenir la direction souhaitée de chaque piéton au cours du temps.

Concernant le couplage piéton-structure, nous cherchons d'abord à modéliser le chargement dynamique d'un seul piéton sur une structure vibrante. Le corps humain peut être vu comme un système mécanique très complexe, composé de plusieurs parties en interaction réciproque. Une alternative est de trouver un bon compromis entre l'exigence de la simplicité du modèle de piéton et l'exigence de reproduire correctement un phénomène complexe comme la synchronisation entre piéton et structure. Erlicher et al. [4] ont proposé un oscillateur auto-entretenu à un degré de liberté capable de prédire avec précision la force latérale générée par un piéton. Abrams [1] a représenté l'action du piéton sur une passerelle par une force latérale sinusoïdale de module 35N et dont la phase totale est gérée par une équation différentielle de type Kuramoto. Bodgi [2] s'est inspirée de ce modèle pour réaliser le couplage piéton-structure. Nous avons choisi d'utiliser le même modèle que dans [2], comportant plusieurs équations : une de la dynamique de la structure avec excitation due aux piétons et, pour chaque piéton, une équation différentielle de Kuramoto [12] relative à l'oscillation de sa marche.

Des simulations numériques générées avec le modèle 2D complet sont réalisées et les résultats sont comparés avec ceux de deux modèles existant de la littérature [2, 12].

---

**Mots clés** — Assemblée de grain, foule, contact, interaction foule-structure, synchronisation.

## Références

- [1] D.M. Abrams. *Two coupled oscillator models : the Millenium bridge and the chimera state*, PhD thesis, Cornell University, 2006.
- [2] J. Bodgi. *Synchronisation piétons-structure : Application aux vibrations des passerelles souples*, PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008.
- [3] S. Dal Pont, E. Dimnet. *Theoretical approach to instantaneous collisions and numerical simulation of granular media using the A-CD<sup>2</sup> method*, Communications in Applied Mathematics and Computational Science -Berkeley, Vol. 3/1, pp. 1-24, 2008.
- [4] S. Erlicher, A. Trovato, P. Argoul. *Modeling the lateral pedestrian force on a rigid floor by a self-sustained oscillator*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 24, pp. 1579-1604, 2010.
- [5] M. Frémond. *Rigid bodies collisions*, Physics Letters A, Vol. 204, pp. 33-41, 1995.
- [6] M. Frémond. *Collisions*, Edizioni del Dipartimento di Ingegneria Civile dell' Università di Roma Tor Vergata, 2007.
- [7] D. Helbing, I. Farkas, T. Vicsek. *Simulating dynamic features of escape panic*, Nature, Vol. 407, pp. 487-490, 2000.
- [8] R. Kimmel, J.A. Sethian. *Fast marching methods for computing distance maps and shortest paths*, Technical Report 669, CPAM, University of California, Berkeley, 1996.
- [9] J.J. Moreau. *Some numerical methods in multibody dynamics : Application to granular materials*, Eur.J.Mech.A/Solids, Vol. 13, pp. 93-114, 1994.
- [10] P. Pécol, S. Dal Pont, S. Erlicher, P. Argoul. *Modelling crowd-structure interaction*, Mécanique & Industries, EDP Sciences, 20 pages, accepted for publication, 2010.
- [11] P. Pécol, S. Dal Pont, S. Erlicher, P. Argoul. *Discrete approaches for crowd movement modelling*, European Journal of Computational Mechanics, Volume special issue "Structure and System Dynamics", 20 pages, submitted for publication, 2010.
- [12] S. Strogatz, D. Abrams, A. McRobie, B. Eckhardt, E. Ott. *Theoretical mechanics : Crowd synchrony on the Millenium bridge*, Nature, Vol. 438, pp. 43-44, 2005.