

Effondrement de grands édifices : des LEGO à la tour de Pise et au-delà

L'étude des fractures de structures basculantes, qu'elles soient homogènes ou constituées d'un motif répétitif, repose sur l'interaction entre les forces environnementales (gravité, vent, ...) et les blocs constitutifs des structures. Les interfaces entre blocs constituent des points d'observation privilégiés.

La résistance de la tour de Pise à l'inclinaison est une énigme. Je souhaite comprendre les mécanismes qui amènent à la rupture des édifices et déterminer les différents modes de ruptures possibles. La tour de Pise tomberait-elle d'un seul tenant ou par section où chaque étage se désolidariserait-il ?

Professeur encadrant du candidat :

Positionnement thématique (phase 2)

PHYSIQUE (Mécanique), PHYSIQUE (Physique de la Matière), INFORMATIQUE (Informatique pratique).

Mots-clés (phase 2)

| Mots-Clés (en français) | Mots-Clés (en anglais) |
|-------------------------|------------------------|
| <i>basculement</i> | <i>toppling</i> |
| <i>contrainte</i> | <i>stress</i> |
| <i>modèle numérique</i> | <i>digital model</i> |
| <i>point de rupture</i> | <i>breaking point</i> |
| <i>tour</i> | <i>tower</i> |

Bibliographie commentée

La tour de Pise a fait l'objet de nombreuses opérations pour tenter de la redresser. C'est une construction ancienne, similaire dans sa conception au campanile de Saint-Marc, qui s'effondra à Venise en 1902 [4]. Son implantation sur un sol malléable et son inclinaison générant des contraintes qui tendent à la faire pencher toujours plus, il est intéressant de se demander ce qui adviendrait si elle venait soudainement à basculer.

Une simple expérience permet de montrer que dans certaines conditions, l'extrémité d'un bâton qui bascule en pivotant sur une extrémité accélère plus vite que g , l'accélération de pesanteur [1]. Cela crée une contrainte mécanique qui tend à plier le bâton. Or, on sait qu'un bâton se casse en son milieu lorsqu'on le plie. C'est pour cette raison qu'une tour suffisamment fragile qui bascule peut se briser en deux au cours de sa chute. Ce phénomène, notamment observé lors de la démolition de cheminées d'usines apparaît également lorsqu'on fait basculer une tour de LEGO de 150 blocs de

hauteur environ [2]. D'abord étudié par Sutton (1936) puis par Bundy (1940) et Marsen (1977) [7,5,6], il est expliqué par trois types de contraintes : un *moment fléchissant*, une *contrainte de cisaillement*, et une *contrainte de traction* (ou de *compression*). Si les contraintes de cisaillement prédominent à grande échelle, elles sont négligeables sur un modèle réduit [3]. Il est donc possible de modéliser une cheminée basculante par un simple empilement de blocs de bois afin de déterminer son point de rupture [3]. La difficulté consiste alors à adapter ce modèle à la tour de Pise. En effet, la tour de Pise, plus large, forme un cylindre creux avec des faces de marbre, dont l'intérieur est rempli de gravats et de mortier [4]. Il s'agit donc de faire de bonnes approximations, et de modéliser les contraintes entre les blocs de marbre et le mortier. Les LEGO permettent d'expérimenter avec des tours de hauteur variable.

Ainsi, on part d'un fantasme pour aboutir à une étude plus générale sur les structures de grande hauteur et des conséquences en matière de prévention de risques ou de gestion des situations de crise.

Problématique retenue

Si la tour de Pise venait à basculer, tomberait elle entière ou se briserait-elle au cours de sa chute ? À quel endroit la rupture aurait-elle lieu, ou combien d'étages faudrait-il lui ajouter pour qu'elle se brise ?

Objectifs du TIPE du candidat

1. Déterminer analytiquement le point de rupture d'une tour homogène basculante.
2. Mettre au point un modèle numérique des contraintes sur une tour inhomogène.
3. Expérimenter avec une tour de LEGOs et confronter les résultats à la théorie.
4. Adapter le modèle au cas d'une tour creuse et l'appliquer à la tour de Pise pour répondre à la problématique.

Abstract

The need for blocs that are easy to pile up into elevated structures without collapsing during the building process decided the choice of LEGOs. A guiding device was added to force the tower to collapse in a given direction. The taut string model was gradually enhanced, with basic elements made of weights and criss-crossing springs that are massively linked into a string. Simulations were programmed in Python, then in Rust for performance purposes. This provided results compliant with observations, for both collapsing trajectory and breaking point position relative to the tower height that were extrapolated to the tower of Pisa.

Références bibliographiques (phase 2)

- [1] <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/falling-faster-g>, le 30/01/2018
Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations : Falling Faster than 'g'.
- [2] Pour la Science, "Le point de rupture des spaghettis." : *N°473 (2017), p. 89-90.*
- [3] VARIESCHI, G., & JULY, I. R. : "Toy blocks and rotational physics." : (2005), *The Physics Teacher*, vol. 43, no 6, p. 360-362.

- [4] JAMIOLKOWSKI, M., R. LANCELOTTA, & C. PEPE. : "Leaning Tower of Pisa—Updated Information." : (1993), *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering* 5. p. 1325
- [5] BUNDY, F. P. : "Stresses in freely falling chimneys and columns." : (1940), *Journal of Applied Physics*, vol. 11, no 2, p. 112-123.
- [6] MADSEN, E. L. : "Theory of the chimney breaking while falling." : (1977), *American Journal of Physics*, vol. 45, no 2, p. 182-184.
- [7] SUTTON, R. M. : "Concerning falling chimneys." : (1936), *Concerning falling chimneys*, vol. 84, no 2176, p. 246-247.

DOT

- [1] *Étude et sélection des LEGO comme blocs permettant de construire une tour haute modulaire.*
- [2] *Conception et construction d'un dispositif de guidage pour orienter la chute de la tour.*
- [3] *Tentative de rapprochement insatisfaisant avec le modèle de la corde avec raideur, suivi d'une modélisation codée en Python.*
- [4] *Remplacement du schéma d'Euler explicite par l'intégration de Verlet et implémentation en Rust pour accroître les performances.*
- [5] *Confirmation de la cohérence entre la simulation et l'expérience après avoir évalué ses paramètres.*
- [6] *Détermination des équivalences entre la maquette et la tour de Pise.*
- [7] *Extrapolation du modèle numérique pour les LEGO à la tour de Pise et réponse à la problématique.*