

Des tours qui chavirent

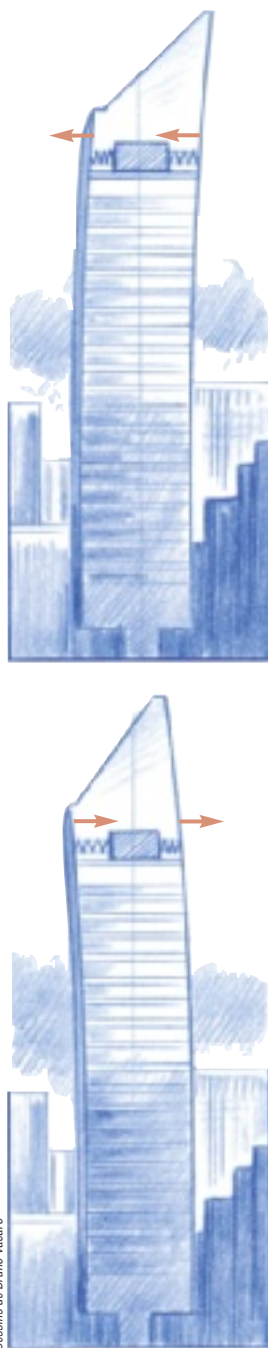
Comment réduire la sensibilité des gratte-ciel au vent ou aux séismes ?
En plaçant de lourdes masses mobiles à leurs sommets.

La rigidité et la résistance des matériaux de construction assurent la solidité des bâtiments. Plus effilés et plus hauts que leurs prédécesseurs, les gratte-ciel d'aujourd'hui sont aussi plus flexibles. Lorsque la terre tremble ou sous l'effet de puissantes rafales de vent, ces constructions oscillent, un peu comme des roseaux. Ces oscillations sont désagréables pour les occupants et risquent d'endommager la structure. Comment les réduire, en particulier quand on a affaire à une tour haute de plusieurs centaines de mètres ?

La Citicorp en danger

À la vue de la tour *Citicorp* à New York, avec ses 59 étages et ses 279 mètres de haut, on a du mal à croire que de simples rafales de vent la menacent. C'est pourtant ce que concluait William Lemessurier, l'ingénieur en chef, un an après l'inauguration du bâtiment en 1977 : à cause de joints inadaptés, il y avait un risque de 50 pour cent que des dégâts majeurs se produisent sous l'effet de rafales de vent de 115 kilomètres par heure soufflant durant cinq minutes. Or de telles conditions météorologiques sont observées à New York tous les 16 ans en moyenne... Il fallait faire quelque chose !

Un bâtiment n'est jamais totalement rigide. Tel un roseau, il peut osciller sous l'effet des rafales de vent. La fréquence de ces oscillations est de l'ordre de dix hertz pour un bâtiment de un étage, de deux hertz pour un bâtiment de trois à cinq étages, de un hertz pour un bâtiment de 10 à 20 étages et de 0,2 hertz pour les gratte-ciel. Dans ces derniers, l'amplitude des oscillations atteindrait quelques dizaines de centimètres au sommet si rien n'était fait pour les prévenir. Une telle déformation n'est pas gênante si elle s'amortit rapidement. C'est souvent le cas dans des tours anciennes comme l'*Empire State Building* : avec une structure en



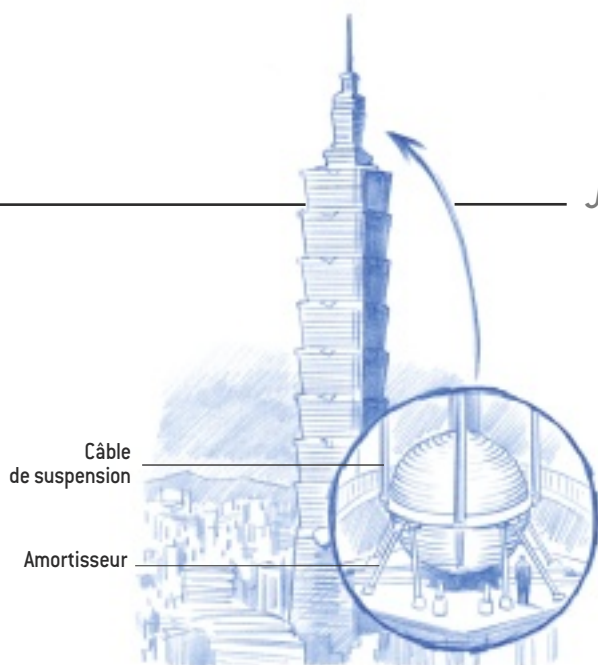
acier complétée par de la maçonnerie en granite et en pierre calcaire, l'ensemble est très massif et très rigide, ce qui limite l'amplitude des oscillations, et les frottements entre murs garantissent un bon amortissement.

Aujourd'hui, en dehors des poutrelles en acier, les gratte-ciel font le plus souvent appel à l'aluminium et au verre, ce qui les rend plus légers, plus effilés, plus beaux... mais aussi moins aptes à dissiper l'énergie vibratoire ! La tour *Citicorp* oscille ainsi avec une période de 6,5 secondes, et l'amplitude de ces oscillations ne diminue que de un pour cent par cycle ; il faut donc une bonne dizaine de minutes pour que la vibration s'éteigne d'elle-même. Or pendant cet assez long laps de temps, des forces extérieures telles que les rafales de vent peuvent entretenir les oscillations, voire les amplifier par effet de résonance jusqu'à la catastrophe, comme le prévoyaient les nouveaux calculs de W. Lemessurier.

Pour limiter ces oscillations, il suffit d'utiliser, comme pour les véhicules, des amortisseurs. Mais à la différence de ce que l'on fait pour une automobile en reliant la partie mobile (la caisse) à la partie en contact avec le sol (les roues), il n'est pas possible de relier le sommet de la tour au sol. La solution la plus souvent retenue depuis une trentaine d'années est d'installer au sommet du gratte-ciel un oscillateur résonnant muni d'un dispositif d'amortissement.

C'est ce qui avait été réalisé lors de la construction de la tour *Citicorp* pour assurer le confort des occupants. Cet oscillateur 250 fois plus massif que tous ceux installés jusqu'alors est composé d'une masse de quelque 400 tonnes placée sur une couche d'huile et reliée aux murs par des ressorts et des amortisseurs. En vertu de sa grande inertie, lorsque les vibrations de

1. L'oscillateur de la tour Citicorp est constitué d'une masse de 400 tonnes, reliée à la structure par des ressorts et des amortisseurs. Quand la tour vibre sous l'influence de violentes rafales de vent, la masse reste en place par inertie, et des forces de rappel (en orange) s'exercent sur la tour.



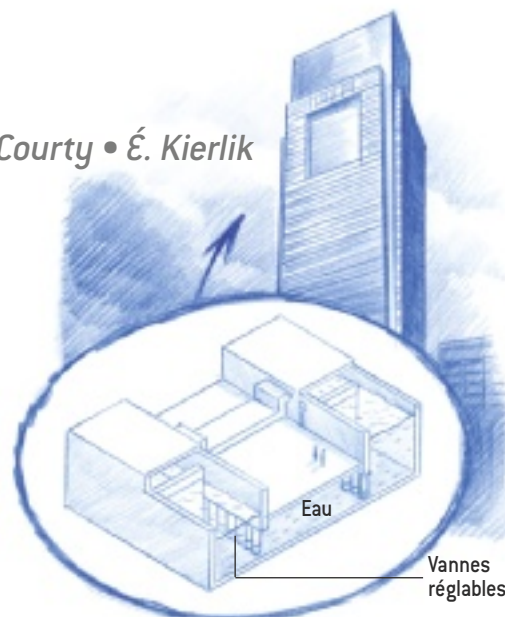
2. Les oscillations de la tour Taipei 101 sont atténuées grâce à une boule d'acier de 660 tonnes, suspendue par quatre câbles de 11,5 mètres et reliée à des amortisseurs.

la tour sont rapides, la masse tend à rester immobile par rapport au sol tandis que les murs bougent : le ressort de l'un des côtés se comprime pendant que l'autre se détend. Ces ressorts exercent alors sur la structure des forces qui tendent à la ramener vers sa position initiale (voir la figure 1).

De plus, lorsque la fréquence naturelle d'oscillation de la tour et celle du dispositif installé sont identiques, l'énergie mécanique se transfère alternativement d'un oscillateur à l'autre. L'intérêt est alors double : l'énergie se répartit en moyenne équitablement sur les deux oscillateurs, ce qui réduit en moyenne l'amplitude des oscillations de l'immeuble. Par ailleurs, le mouvement relatif entre le bâtiment et la masse étant important (les ressorts supportent des déplacements de 1,4 mètre), il est facile d'introduire de l'amortissement : l'atténuation atteint 14 pour cent pour la masse, et cinq pour cent (au lieu de un) pour la tour. Avec ses nouveaux calculs, W. Lemessurier s'aperçut que cet oscillateur initialement prévu pour le confort était en fait crucial pour la sécurité de la structure. Il décida donc d'installer des générateurs électriques de secours, permettant aux 12 coussinets d'huile sous pression qui soulèvent la masse de rester actifs même en cas de panne électrique. Par prudence, il fit aussi renforcer tous les rivets de la tour.

Boule d'acier ou piscine en U

À mesure que les gratte-ciel prennent de la hauteur, les dispositifs deviennent de plus en plus imposants. Pour produire un effet suffisant, la masse de l'oscillateur doit être de l'ordre du centième de la masse du bâtiment (elle est de deux pour cent pour la Citicorp). Celui de la tour Taipei 101, à Taiwan, est particulièrement impressionnant. Cette tour a 101 étages et est haute de 508 mètres. Ses 95 000 tonnes d'acier et ses 23 900 mètres cubes de béton de grande résistance lui confèrent une bonne rigidité. Elle oscille toutefois avec une période de 6,8 secondes et une amplitude maximale de quelques dizaines de centimètres, ce qui correspond à une accélération horizontale atteignant quelques centièmes de l'accélération de la pesanteur : assez pour donner la nausée.



3. Le Comcast Center à Philadelphie est muni d'un réservoir de 1 100 tonnes d'eau en forme de U. Les oscillations du liquide, amorties par des vannes, permettent d'atténuer celles du gratte-ciel.

Le dispositif installé pour limiter les oscillations de la tour Taipei 101 est un pendule : une boule d'acier de 5,5 mètres de diamètre et pesant 660 tonnes, suspendue par quatre câbles de 11,5 mètres de long. Des amortisseurs contrôlent l'amplitude des oscillations de cette masse. En cas de séisme important, les déplacements attendus seraient de deux à trois mètres, ce qui est excessif. Aussi, dès que l'amplitude des oscillations dépasse les 30 centimètres, la masse est bloquée. Cela permet notamment d'éviter des collisions avec les murs. Le séisme passé, la masse peut être relâchée.

Ces oscillateurs, devenus indispensables, s'améliorent et font appel à des dispositifs de plus en plus variés. Certains utilisent, plutôt que des masses solides, de l'eau oscillant dans des réservoirs en forme de U. Il est alors plus facile d'utiliser de grandes masses (1 100 tonnes par exemple pour le Comcast Center de Philadelphie) et d'ajuster les caractéristiques de l'oscillateur. En modifiant la pression de l'air au-dessus de l'eau, on change la raideur de ce « ressort » et ainsi sa fréquence propre d'oscillation. En modifiant la taille des vannes placées dans la canalisation, on augmente ou diminue la dissipation d'énergie.

On peut aussi réaliser des dispositifs totalement actifs avec des masses dix fois inférieures. L'accélération du bâtiment est mesurée en continu et une force contrebalançant ce mouvement est appliquée en accélérant une masse faible, mais rapide. Cette évolution conduit à appliquer aux bâtiments des méthodes analogues à celles utilisées pour stabiliser les véhicules, navires et avions.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris.

Y. Fujino et al., *Structural control : basic concepts and applications*, in *Proceedings of the 1996 ASCE Structures Congress*, Chicago, Illinois, 15-18 avril 1996.

T. HASKETT et al., *Tuned mass dampers under excessive structural excitation* (www.motioneering.ca/User/Doc/1273.pdf).