

# Comment réagit un ouvrage

STÉPHANE HEDOUIN <sup>[1]</sup>

*Les événements récents du Japon ont mis en avant les effets induits d'un séisme. Après un rappel des concepts fondamentaux de sismologie, l'auteur propose une sensibilisation au risque sismique via plusieurs manipulations. Articulées autour de fiches pratiques, ces activités permettent de mettre en œuvre les paramètres intervenant dans la construction parasismique. Nul doute que ces fiches seront d'un grand secours pour l'enseignement transversal en STI2D comme pour la technologie en collège.*

La sécurité parasismique des bâtiments n'est pas uniquement une question de calculs et de dimensionnement de la structure porteuse. Elle dépend en grande partie de la conception et de l'exécution de la structure porteuse et des éléments non porteurs. Après avoir abordé les notions de risque et d'acceptabilité sociale de ce risque, nous allons proposer un ensemble de manipulations et d'observations, à destination des élèves de collège et des sections STI2D, des principes de base de la conception parasismique des bâtiments.

[1] Professeur agrégé de génie civil au lycée Pierre-Simon-de-Laplace de Caen (14).

## Mots-clés

collège,  
dynamique,  
lycée  
technologique,  
travaux  
pratiques

## Légende

collège

lycée

Tous

L'enseignement d'exploration « sciences de l'ingénieur » (SI) en partenariat avec le professeur de SVT ou de géographie se prête également à des activités sur ce thème. Il est par exemple possible d'exploiter à distance les mesures d'une station sismologique, ou d'observer des vidéos des effets d'un séisme sur de petites maquettes reproduisant le comportement des bâtiments simples face à une excitation du sol.

## Remarques :

● On considérera que le chapitre sur la tectonique des plaques a été traité en amont et en coopération avec le professeur de géographie ou de SVT.

● Les notions et manipulations sont repérées, selon la difficulté et les prérequis nécessaires, en fonction des objectifs à atteindre : sur fond bleu, au collège ; sur fond vert, au lycée en voie technologique STI2D. Celles qui sont communes aux deux sont sur fond beige.

## Généralités

Un séisme correspond au glissement très brutal de deux parts de l'écorce terrestre appelées compartiments tectoniques, soit au sein de la couverture sédimentaire soit dans la lithosphère elle-même. Ces compartiments, situés à plus ou moins grande profondeur, se trouvent séparés par une faille. Lorsque le jeu de la faille se produit, des ondes sismiques sont émises : elles se propagent jusqu'à la surface de la terre où elles peuvent alors être détectées par des capteurs appelés sismomètres et enregistrées par des appareils appelés sismographes (voir « Quelques définitions » en encadré).

## Quelques définitions

Un séisme est une vibration du sol causée par une cassure en profondeur de l'écorce terrestre. Cette cassure provient des mouvements relatifs de la roche (tectonique des plaques). Lorsque les frottements entre plaques sont importants, leur mouvement est bloqué. De l'énergie s'accumule, et lorsque la limite de résistance des roches est atteinte, il y a brusquement rupture et déplacement. Les dégâts causés sont fonction de l'amplitude, de la durée et de la fréquence des vibrations.

Un séisme est caractérisé par :

- le point d'origine du séisme en profondeur, le foyer ou *hypocentre*. On parle aussi de l'*épicentre* qui est la projection verticale du foyer à la surface ;
- la mesure de l'énergie libérée sur l'échelle de Richter, la *magnitude* ;
- la mesure sur l'échelle EMS 98 des dégâts provoqués, humains et matériels, par le séisme en un lieu donné à la surface, l'*intensité*. Généralement, l'intensité décroît avec l'éloignement du foyer, mais elle dépend aussi de la densité de population, de la géologie locale, de la topographie, des effets directs et induits. Il n'y a donc pas de correspondance directe entre intensité et magnitude ;
- la fréquence et la durée des vibrations, ces deux paramètres ayant une incidence fondamentale sur les effets en surface.

## Les échelles de mesure

● **Échelle de Richter** : échelle logarithmique de mesure de l'amplitude maximale de l'onde de surface générée par un séisme. L'augmentation d'une unité correspond à une multiplication par 10 de l'amplitude et par 30 de l'énergie. Cette échelle présente trois inconvénients majeurs : elle fluctue énormément selon le point de mesure et l'appareil utilisé ; elle ne fonctionne pas pour les séismes profonds (de plus de 100 km) qui ne dégagent pas d'ondes de surface ; les ondes mesurées étant les dernières à arriver, l'estimation de la magnitude, primordiale à l'alerte des populations, est tardive.

● **Échelle macrosismique européenne (EMS 98)** : échelle d'intensité. Elle classe les bâtiments selon leur vulnérabilité et comporte 12 degrés allant de « secousses imperceptibles » à « catastrophe généralisée ».

## La réglementation

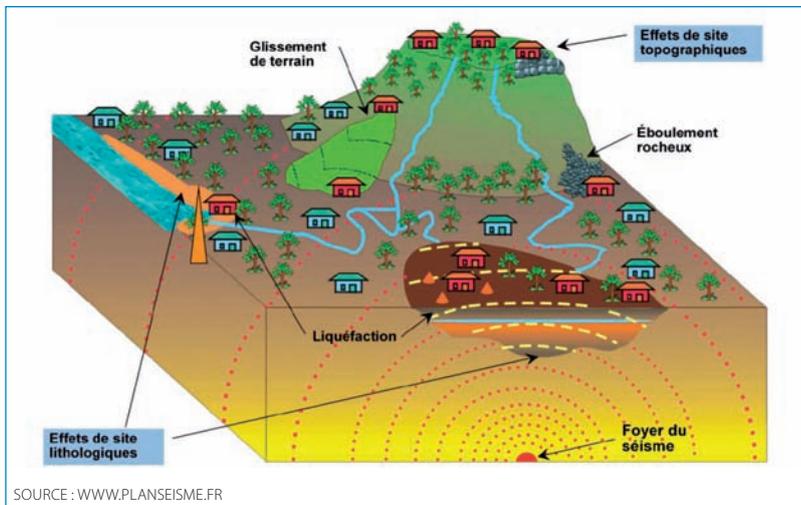
● **Zonage sismique** : classement en 5 zones de sismicité croissante (0, Ia, Ib, II et III) selon le niveau sismique à prendre en compte pour l'application des règles de constructions parasismiques.

● **Aléa sismique** : probabilité d'occurrence dans une région et au cours d'une période donnée d'un phénomène pouvant engendrer des dommages.

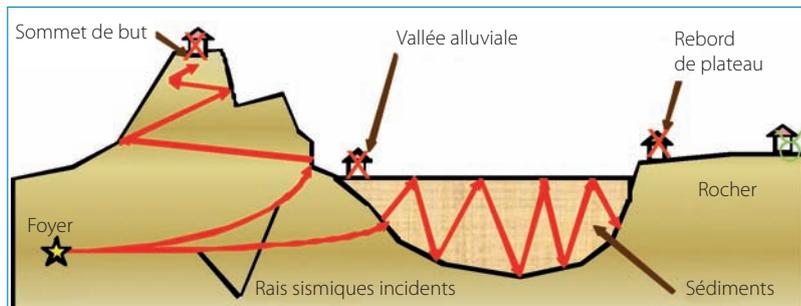
● **Vulnérabilité** : pourcentage de pertes (de 0 à 100 %) en fonction de l'importance du séisme (atteintes à la population, endommagements des constructions et des infrastructures, pertes indirectes : moyens de production, conséquences sociales...).

● **Risque** : probabilité de pertes en vies humaines, blessés, dommages aux biens et atteinte à l'activité économique au cours d'une période de référence et en une région donnée pour un aléa particulier. Le risque est la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité.

# face à un séisme ?

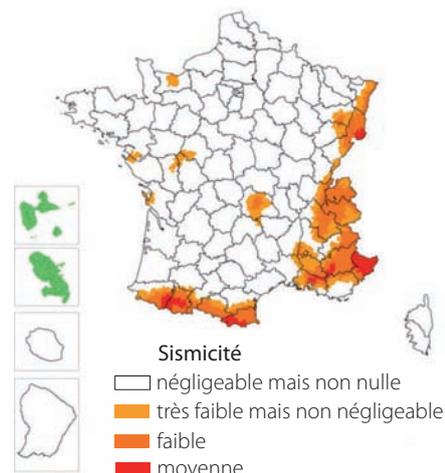


## 1 Les effets directs et induits d'un séisme



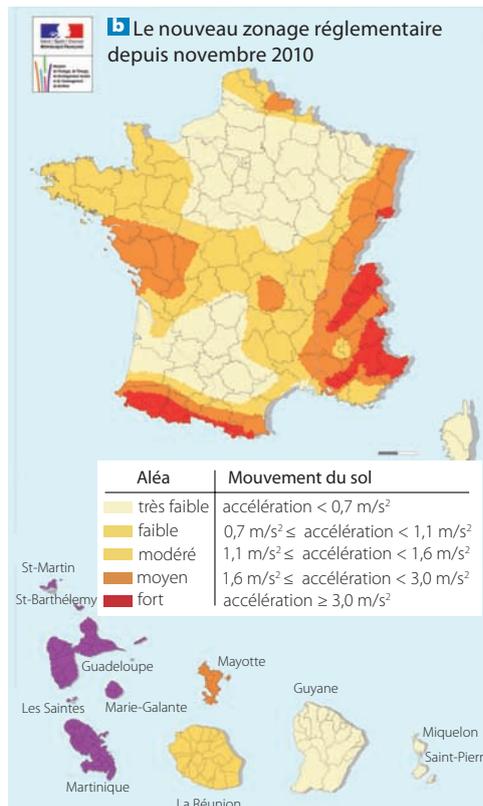
## 2 Propagation des ondes et effets de site

a L'ancien zonage sismique de la France (1988-2010)



SOURCE : WWW.PLANSEISME.FR

b Le nouveau zonage réglementaire depuis novembre 2010



## 3 L'évolution du classement des zones sismiques en France

Un séisme se traduit par la propagation d'ondes élastiques volumiques et surfaciques. Ce sont ces dernières, et leurs effets indirects, qui sont les plus dangereuses pour les habitats **1**. Ces ondes sont assimilées à des vibrations mécaniques périodiques caractérisées par leur amplitude, allant du millimètre à plusieurs mètres, et par leur fréquence, de 0,01 à 50 Hz. Les périodes les plus agressives (plateau du spectre) sont comprises entre 0,03 et 0,6 s, soit, pour les fréquences, entre 1,5 et 30 Hz, ce champ restant variable en fonction de la nature du sol, rocheux ou alluvial « mou » **2**. Les effets d'un séisme peuvent être directs – vibration du sol et son atténuation ou amplification par des effets de site, rupture éventuelle d'une faille en surface –, induits – mouvements de terrain, liquéfaction du sol, raz de marée – ou de natures diverses, par exemple des phénomènes hydrogéologiques.

### L'aspect réglementaire

Le zonage sismique actuellement en vigueur en France a été rendu réglementaire en 1991. Au départ fondé sur l'étude de la sismicité historique, il utilisait une approche *pseudostatistique* **3a**. Les nouvelles normes de construction européennes Eurocode8 précisent la nature des règles de construction qui doivent s'appliquer sur un zonage sismique de type *probabiliste* prenant en compte différentes périodes de retour. En conséquence, la France, devant se préparer à l'application de ces normes européennes sur son territoire, a engagé une révision du zonage en vigueur **3b** (voir « Quelques définitions » en encadré).

L'objectif principal de la réglementation parasismique est la sauvegarde du maximum de vies humaines pour une secousse dont le niveau d'agression est fixé pour chaque zone de sismicité.

### La magnitude sismique et les phénomènes ondulatoires

C'est en 1935 que Charles Richter, un sismologue américain qui étudiait les séismes de Californie, se rendant

compte qu'il lui fallait classer ces séismes autrement que par les dénominations « gros séisme » ou « petit séisme », a établi l'échelle de magnitude qui porte son nom et traduit la puissance d'un séisme exprimée en micromètres. C'est une échelle logarithmique : l'énergie d'un séisme de magnitude 6 est respectivement 10 fois, 100 fois et 1 000 fois plus importante que celles des séismes de magnitude respectivement 5, 4 et 3.

Les aspects vibratoires peuvent être mis en évidence par l'étude des mouvements d'un oscillateur libre puis forcé.

● Oscillateur libre

Un oscillateur libre est un système qui, lorsqu'il est déplacé de sa position initiale, est soumis à une force de rappel qui tend à le ramener à sa position d'équilibre, ce qui se traduit par des oscillations autour de cette position 4. C'est le cas du pendule simple amorti oscillant sous l'effet de la gravité.

La période propre est la période à laquelle oscille ce système lorsqu'il est en évolution libre, c'est-à-dire sans force excitatrice extérieure ni forces dissipatives (frottements ou résistances par exemple).

La période propre  $T_p$  (en secondes) du pendule simple est aussi donnée par la relation :

$$T_p = 2\pi \sqrt{L/g}$$

L : longueur en mètre (m)

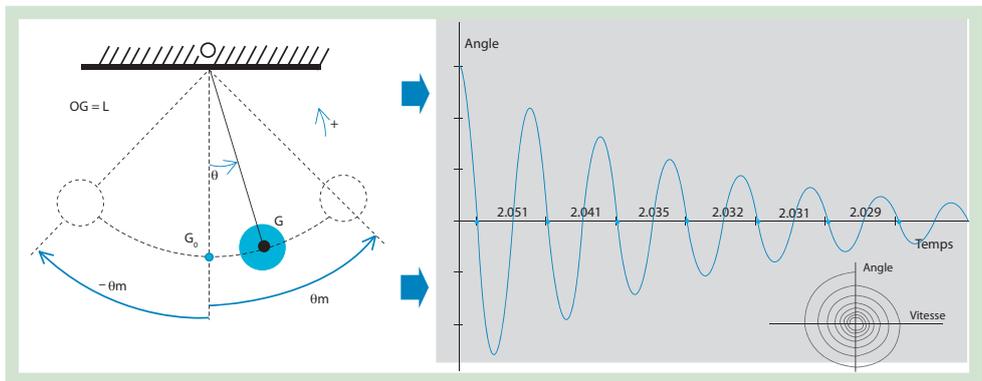
g : intensité de la pesanteur en  $m \cdot s^{-2}$

Considérons maintenant un pendule inversé 5 constitué d'une boule de masse M sur une tige souple fixée au sol. Si on écarte la boule de sa position d'équilibre, la tige est fléchie, et cette flexion génère une force de rappel ( $F_r$ ) proportionnelle à la raideur (k) de la tige et à la distance d'écart par rapport à la verticale (x).

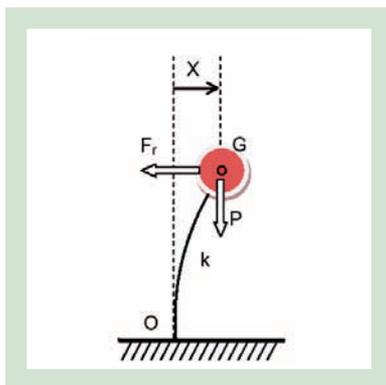
La période propre  $T_p$  du pendule inversé est donnée par la formule suivante :

$$T_p = 2\pi \sqrt{M/k}$$

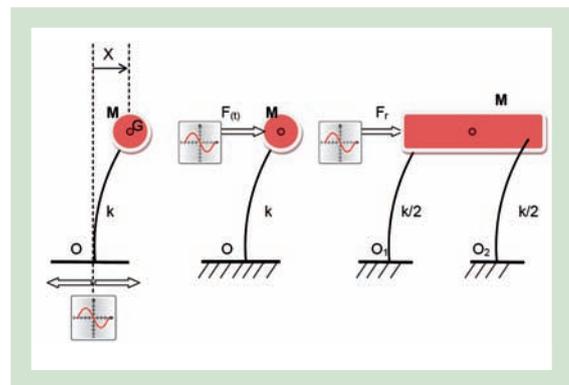
Les tremblements de terre sont un mouvement du sol. On montre



4 L'analogie entre séisme et pendule vibrant



5 Le pendule inversé

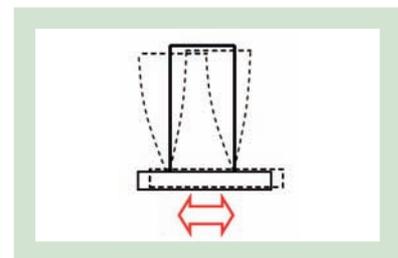


6 L'analogie entre bâtiment et pendule inversé

que ce mouvement appliqué au pendule inversé revient à un problème de même nature que celui qui consiste à appliquer une poussée périodique à la masse du pendule. Par ailleurs, sur le plan mécanique, un pendule inversé peut être schématiquement équivalent à une construction telle qu'un château d'eau, qui est un réservoir rempli d'eau (la boule) sur une structure tubulaire (la tige), ou un immeuble à un étage de masse M reposant sur des murs de raideur  $k/2$  6. L'analogie entre le mouvement sismique et le pendule est faite par application d'une brève poussée au sommet du pendule inversé.

● Oscillateur forcé

Un oscillateur forcé est un oscillateur libre sur lequel s'applique une force de nature périodique 7. Soumis à cette force, il va se mettre à osciller à la période de la force appliquée avec une amplitude d'autant plus grande que cette période est plus proche de la



7 Un oscillateur forcé

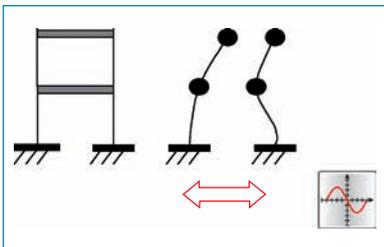
période propre de l'oscillateur. C'est le cas d'une balançoire lorsqu'on balance ses pieds afin de la faire accélérer.

Pour un ouvrage, l'oscillation forcée correspondrait à une force supplémentaire créée par une excitation du sol – un séisme.

Les deux phénomènes précédents se conjuguent : un ouvrage est forcément toujours sollicité en oscillation forcée durant le séisme, puis revient en oscillation libre après les secousses.

● Oscillations multiples

Un ouvrage de plusieurs étages est considéré comme un oscillateur mul-



8 Un oscillateur multiple

multiple 8, ce qui rend d'autant plus complexe l'étude du comportement du bâtiment. Nous n'aborderons pas cette modélisation théorique dans la partie des manipulations.

#### ● L'amortisseur

Un amortisseur est un système destiné à limiter l'amplitude des oscillations forcées transmises par le sol 9. Il opère par dissipation d'énergie.

L'amortissement est une solution favorable pour diminuer les effets destructeurs sur les structures en cas de séisme.

#### ● L'inertie

Lorsque l'on prend un balai au milieu du manche 10, il est plus aisé de le faire tourner autour de l'axe du manche 1 qu'autour d'un axe transversal 2. Cela est dû au fait que, dans le second cas, la matière constituant le balai se trouve, en moyenne, plus éloignée de l'axe de rotation. L'inertie, c'est-à-dire la difficulté à mettre l'objet en mouvement autour de l'axe de rotation, n'est pas la même selon le choix de l'axe.



9 Un amortisseur sous un ouvrage en Martinique (société Freyssinet)

Pour un solide en rotation, l'énergie cinétique est proportionnelle à cette inertie et au carré de la vitesse. Lors d'un tremblement de terre, le sol communique de l'énergie au bâtiment. Dans une première approche, on peut considérer que cette énergie est globalement constante le long du bâtiment. Les masses ponctuelles des structures les plus éloignées des axes de rotation ayant une inertie plus grande, elles vont avoir une vitesse linéaire plus faible. Cela va générer un phénomène de retard, en raison d'un différentiel de vitesse entre tous les points de la structure. Lors de la conception architecturale d'un bâtiment de grande hauteur en zone sismique, l'architecte doit donc tenir compte de ces inerties pour choisir l'orientation des éléments constituant la structure de l'immeuble de manière à leur donner l'inertie la plus faible.

#### ● La raideur de la structure

La raideur est la caractéristique qui indique la résistance à la déformation élastique d'un corps (par exemple un ressort). Plus une pièce est raide, plus il faut lui appliquer un effort important pour obtenir une déflexion donnée 11. Son inverse est appelé souplesse ou flexibilité.

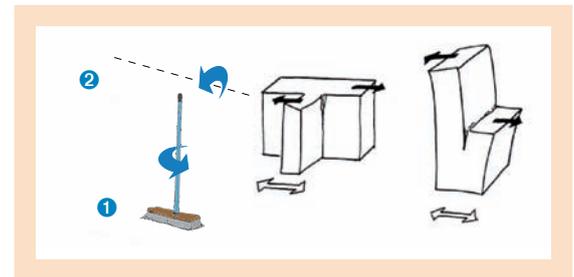
Ainsi, la raideur, notée  $k$ , exprime en newtons par mètre (N/m) la relation de proportionnalité entre la force  $F$  appliquée en un point et la déflexion de la structure  $x$  résultante en ce même point :

$$k = F/x$$

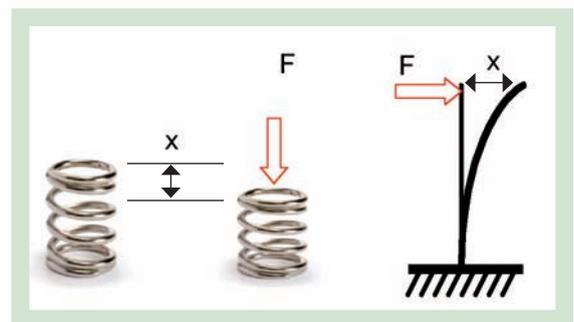
On peut parler de raideur en traction-compression et en flexion.

Les paramètres qui interviennent sur la raideur de certains éléments de la structure d'un ouvrage (poteau, poutre, plancher...) ou sur une structure complète (un bâtiment dans son ensemble constitué de plusieurs éléments associés) sont : la longueur, l'aire et la forme de la section, la nature des liaisons et le matériau.

Les raideurs d'un bâtiment et de ses masses constituantes vont permettre d'obtenir les périodes propres de l'ouvrage.



10 L'influence de l'orientation sur l'inertie et les dommages occasionnés par des oscillations asynchrones (différentielles) au droit des volumes



11 Raideur d'un ressort et déflexion

#### ● La résonance

La résonance est une augmentation de l'amplitude de l'oscillation qui a lieu à une fréquence propre à chaque système appelée fréquence de résonance. Un système résonant peut accumuler une énergie si celle-ci est appliquée sous forme périodique, et qu'elle est proche de sa fréquence propre. Soumis à une telle excitation, le système va être le siège d'oscillations de plus en plus importantes, jusqu'à atteindre un régime d'équilibre qui dépend des éléments dissipatifs du système lui-même (bâtiment ou ponts).

#### → Exemple du pont de Tacoma 12 :

Du fait du couplage aéroélastique, un échange d'énergie mécanique se produit entre le vent et le pont qui oscille. Dans le cas du pont de Tacoma, la déformation en torsion du tablier correspond à une variation de l'angle d'incidence du vent. Ce changement d'incidence modifie l'écoulement du vent autour du tablier, qui en retour modifie le couple de torsion, de sorte que le pont capte de l'énergie au vent chaque fois qu'il oscille. L'amplitude des vibrations augmente

progressivement jusqu'à ce que la déformation engendre des effets sur les câbles et les autres composants qui conduisent finalement à la destruction du pont. Cette explication a été confirmée par plusieurs études en soufflerie depuis les années 1940, et ce phénomène aujourd'hui bien connu des concepteurs est systématiquement étudié.

Les immeubles, plus particulièrement les tours et les gratte-ciel, présentent aussi, en cas de séisme, la particularité de pouvoir entrer en résonance. D'une façon générale, lorsqu'on fait vibrer une structure à une certaine période dépendant de ses caractéristiques géométriques (longueur, largeur, hauteur) ou mécaniques (masse, rigidité), la structure peut réagir en amplifiant considérablement les vibrations.

● **Analyse énergétique de l'équilibre dynamique d'un bâtiment en oscillation horizontale**

L'énergie que le sol communique à la construction ( $E_{sol}$ ) est en partie dissipée par un amortissement ( $E_{dis}$ ). Mais les constructions sont à la fois en mouvement et déformées sous l'effet du séisme. Restent donc une forme d'énergie non dissipée – une énergie cinétique ( $E_{cin}$ ) – et une énergie de déformation élastique ( $E_{pla}$ ) qui correspond à une énergie potentiellement stockée 13.

La vitesse des secousses conditionne la quantité d'énergie transmise à la construction. Cette quantité augmente avec le carré de la vitesse :

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

$E_{pla}$  et  $E_{cin}$  se transforment alternativement l'une en l'autre pendant les oscillations. L'énergie cinétique non dissipée se transforme en énergie potentielle stockée. L'équilibre dynamique s'écrit donc :

$$E_{sol} = E_{dis} + E_{pla} + E_{cin}$$

*Remarque :* Ce chapitre ne traite volontairement pas des oscillations verticales et de torsion qui existent aussi en parallèle.

**Minimaliser l'action sismique pour protéger les bâtiments**

Pour favoriser la résistance d'une construction aux séismes, on peut minimaliser l'action sismique, c'est-à-dire les effets dus à l'inertie des masses auxquelles elle sera soumise et l'énergie communiquée par les secousses. On peut aussi maximiser la capacité de réaction du bâtiment en accroissant :

- sa résistance mécanique ;
- sa capacité à stocker l'énergie, grâce à ses déformations élastiques, comme un ressort ;
- sa capacité à dissiper l'énergie par réflexion vers le sol, par frottement externe à l'aide d'amortisseurs ou par amortissement interne (viscosité des matériaux).

La solution la plus simple consisterait à construire avec de faibles masses. On peut aussi agir sur la réduction de l'accélération que la construction subit au moment du séisme en choisissant un site et

un terrain d'implantation qui ne donnent pas lieu à des amplifications désastreuses, qui dépendent à la fois de l'accélération prévisible du sol où se situe l'ouvrage et de l'amplification portée sur ce dernier. Cette notion correspond à une « réponse » des constructions aux séismes, directement liée à la conception même de l'ouvrage.

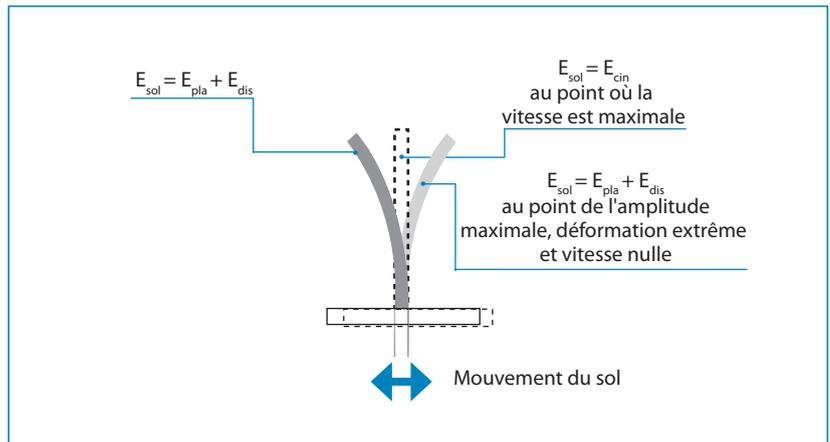
En se limitant aux effets directs et induits, nous pouvons dégager trois types de structures :

- Les structures infiniment rigides avec une période propre pratiquement nulle  
Exemple : blockhaus
- Les constructions ayant une période propre comprise entre 0,1 et quelques secondes  
Exemples : maisons courantes et bâtiments rigides en béton armé
- Les constructions ayant de très longues périodes d'oscillation, supérieures à 5 secondes (ouvrages souples et flexibles)  
Exemple : immeubles de grande hauteur

Dans le cas des immeubles de très grande hauteur, comme à Taipei, les ingénieurs ont adopté une solution originale : la mise en place d'une sphère de 800 tonnes à une certaine distance du sol pour reprendre les effets dus aux séismes et au vent 14. C'est le principe de l'amortisseur par masse accordée. Ce thème est repris un peu plus loin dans la liste des manipulations proposées.



12 L'écroulement du pont de Tacoma



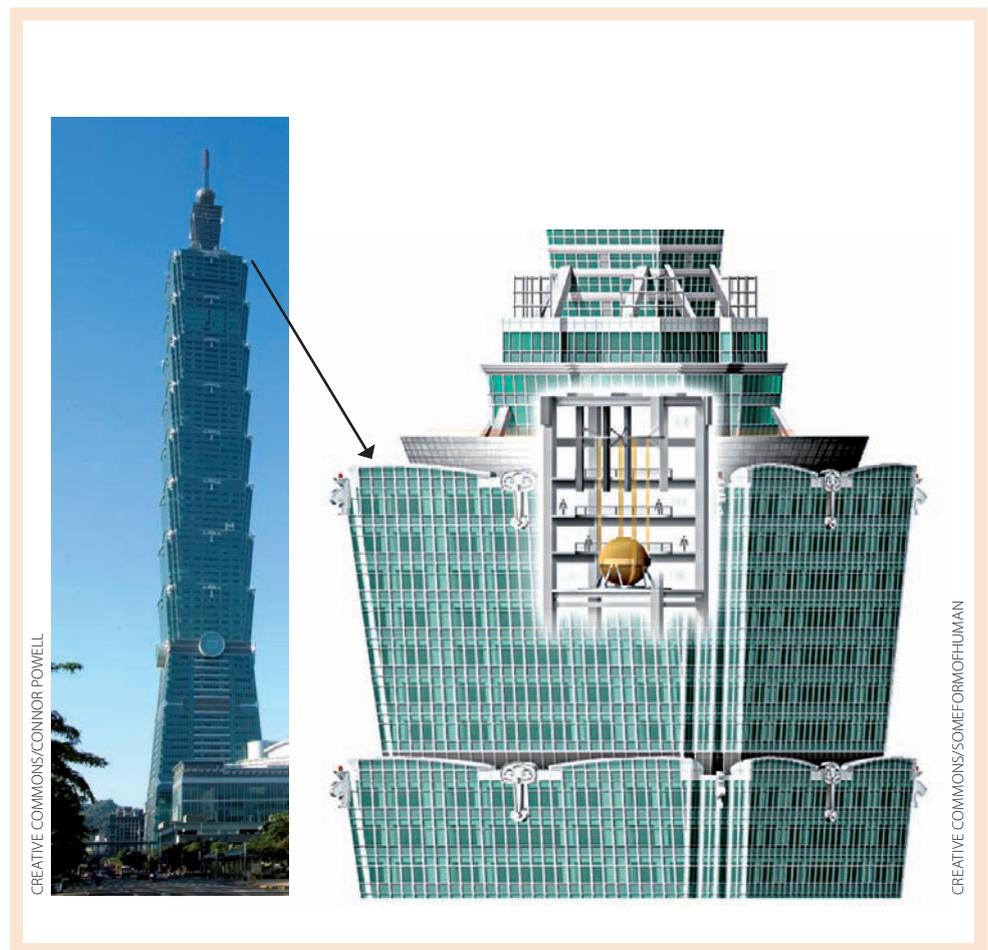
13 L'équilibre énergétique d'une tour

### Les activités pédagogiques

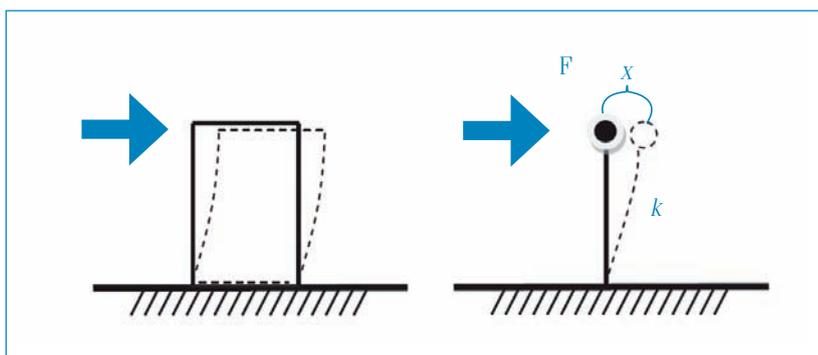
Chaque activité est présentée sous forme de fiche, dans laquelle on retrouve l'objectif des manipulations, les détails techniques du matériel nécessaire ainsi qu'une explication du protocole à suivre. Les manipulations sont basées sur les phénomènes observables à partir d'une maquette en oscillateur simple.

Les maquettes présentées sont simples et ont pour but de faciliter l'étude des phénomènes parfois complexes de la dynamique de la structure. Dans toutes les manipulations proposées, elles peuvent être utilisées selon différents modes :

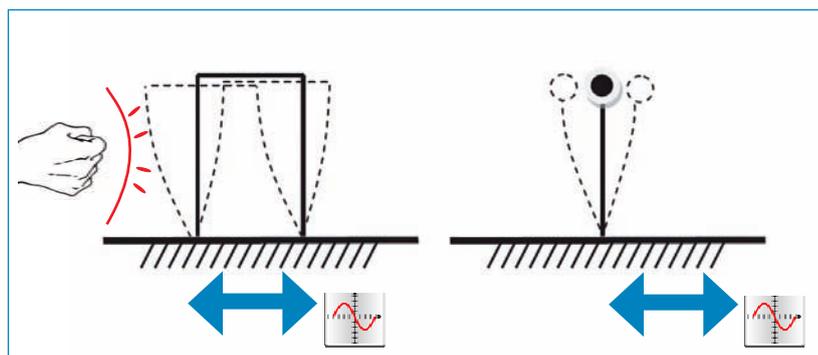
- **En quasi-statique** : La manipulation consiste à analyser la raideur en réponse à l'application d'un effort constant **15**.
- **En dynamique selon les modes propres** : La réponse de la structure à un séisme dépend de ses modes propres (périodes) de vibration. Ces derniers ne dépendent pas du séisme et peuvent être visualisés lorsque la structure est en oscillation libre lors d'un essai au lâcher **16**.
- **En dynamique selon des oscillations forcées (résonance)** : Après



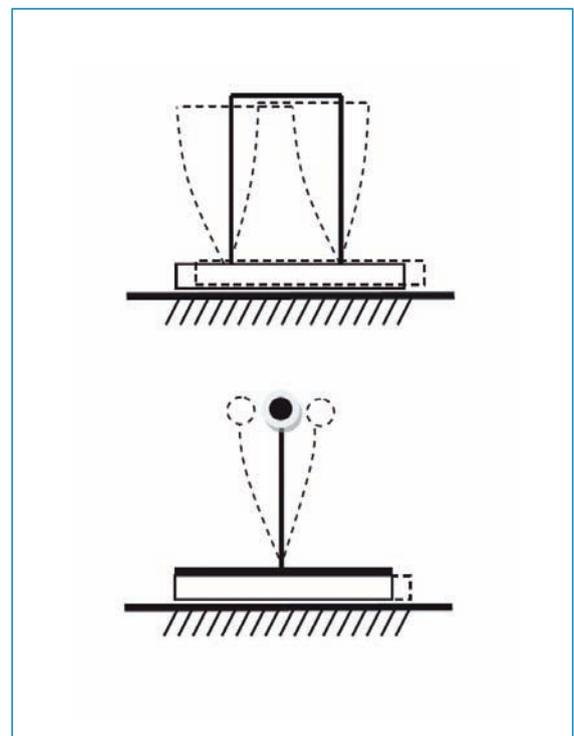
**14** L'amortissement par masse accordée (gratte-ciel Taipei 101, à Taipei, Taiwan, 509 m)



**15** Un essai en quasi-statique



**16** Un essai dynamique selon les modes propres



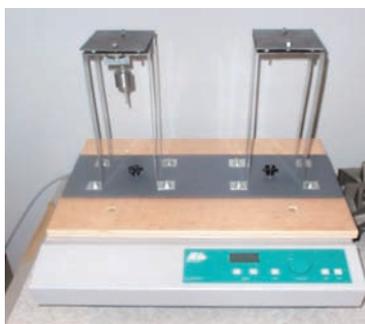
### Mise en œuvre

#### Matériel

- Une table à secousses **a**, par exemple le modèle référencé « table d'agitation va-et-vient » Delta Labo Promax 2020 avec une vitesse ajustable de 20 à 400 t/min
- Une plate-forme perforée 2000, nécessaire pour ajuster les équipements
- Une plaque d'acier galvanisée ou de zinc d'épaisseur 0,5 mm
- Des vis et des écrous classiques pour les assemblages
- Des dalles en PVC de 300 × 300 mm, d'épaisseur 5 mm, qui serviront de supports rigides

#### Logiciels

- AviMéca **b**, logiciel libre de pointage de clips vidéo, téléchargeable à l'adresse suivante : [www.ac-rennes.fr/pedagogie/scphys/outinfo/log/avimeca/](http://www.ac-rennes.fr/pedagogie/scphys/outinfo/log/avimeca/)



**a** Des maquettes sur la table à secousses

- Un tableau courant pour tracer des courbes **c**

#### Plans et vidéos

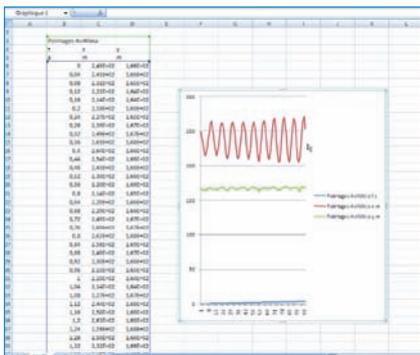
Les plans et vidéos nécessaires à la réalisation de ces activités sont téléchargeables sur le site du Cerpet STI :

[https://www.cerpet.adc.education.fr/ressource\\_fiche.asp?num\\_ressource=717](https://www.cerpet.adc.education.fr/ressource_fiche.asp?num_ressource=717)

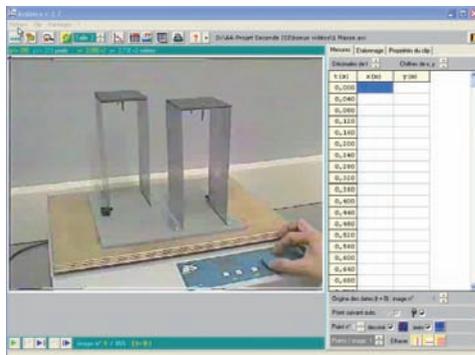
(Portail des filières : Génie civil : Bâtiment\Ressources pédagogiques : « Formation à la construction parasismique en partenariat avec le MEEDDAT »)

#### Recommandations

La mise en route des manipulations nécessite quelques réglages et tests avant d'opérer. Les élèves restent autonomes sur l'exploitation des résultats à partir d'une fiche de guidance préétablie.



**c** L'utilisation du tableau pour éditer les courbes



**b** Le traitement des vidéos

(diaphragmes)

- ⑦ Le phénomène de liquéfaction des sols

Ces activités peuvent être exploitées dans le cadre des enseignements de technologie au collège en classe de 5<sup>e</sup>, de l'enseignement d'exploration « sciences de l'ingénieur » et aussi des nouveaux programmes transversaux du baccalauréat STI2D. Elles visent à compléter un socle de compétences relatives à la compréhension des systèmes techniques et à différencier les solutions scientifiques des solutions techniquement acceptables pour la société.

Elles permettent de découvrir les phénomènes oscillatoires que sont les séismes, d'introduire des notions parfois complexes par l'observation de leurs effets sans nécessairement utiliser les éléments de calcul associés, et d'acquérir une culture technologique sur la conception des ouvrages. C'est également l'occasion de démontrer la synergie des sciences physiques, des sciences de la vie et de la terre et des sciences technologiques dans le cadre du développement durable.

avoir mis en évidence les paramètres de la raideur en statique puis les paramètres des modes propres en oscillation libre, on peut étudier le phénomène de résonance en oscillation forcée **17**, en vue de déterminer la réponse de la structure à un séisme.

Pour ce dernier mode, une table à secousses (agitateur va-et-vient de laboratoire) est nécessaire. Sinon, il est possible de visualiser des petits films au format AVI téléchargeables sur le site du Cerpet (voir la « mise en œuvre » en encadré) qui mettent

en évidence les phénomènes recherchés (influence de la hauteur, de la masse, des masses accordées).

Voici un aperçu synthétique des manipulations proposées :

- ① Les paramètres de sections et de matériaux, la raideur
- ② Les paramètres de masse
- ③ Les paramètres de hauteur, le comportement d'un plancher sous une action horizontale
- ④ L'oscillateur double
- ⑤ Les structures en portique
- ⑥ Les structures horizontales

### Références

Certains éléments présentés sont extraits d'une formation nationale organisée par le Cerpet en coopération avec le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire en 2007-2008 à partir des supports de Milan Zacek et Gérard Hivin. Ils ont été adaptés pour les collégiens et lycéens en EE SI. L'auteur tient à remercier Bernard Collet, professeur au collège Charles-Letot de Bayeux, pour la partie collège.

#### Ouvrages

Collectif, *Le risque sismique en France*, BRGM éditions, coll. « Les enjeux des géosciences », 2009  
Zacek (M.), *Construire parasismique*, éd. Parenthèses, 1996

## Les fiches

Collège	<b>Manipulation 1</b>		<b>Fiche d'observation pour les paramètres de sections et de matériaux</b>		
			Pourquoi existe-t-il des déformations ? Qu'est-ce que la rigidité d'un élément ?		
	Schéma		Objectif	Montrer l'incidence de la déformation de l'échantillon du matériau au travers de la géométrie de sa section sur la période propre de la structure Observer l'importance de la liaison au pied de l'échantillon	
			Description du matériel	<table border="1"> <tr> <td>Matériaux</td> <td>Une table, un pied dans lequel on puisse encastrier des sections de divers matériaux (bois, acier, PVC) Échantillons en lamelles de 200 mm de longueur Sections géométriques au profil en plat, en tube, en H</td> </tr> <tr> <td>Liaisons</td> <td>1<sup>er</sup> cas : encastrement rigide de l'échantillon « type étau »</td> </tr> </table>	Matériaux
Matériaux	Une table, un pied dans lequel on puisse encastrier des sections de divers matériaux (bois, acier, PVC) Échantillons en lamelles de 200 mm de longueur Sections géométriques au profil en plat, en tube, en H				
Liaisons	1 <sup>er</sup> cas : encastrement rigide de l'échantillon « type étau »				
Manipulation Observation	En statique	Il s'agit de mesurer sur le régllet vertical, avec le même poids, les déformations en tête des différents profilés, de sections et de matériaux différents mais de même longueur			
	En oscillation libre	Il s'agit d'observer les oscillations en tête des échantillons lorsque l'on coupe la ficelle et d'en comparer les amortissements			

Lycée	<b>Manipulation 2</b>		<b>Fiche d'observation pour les paramètres de masse</b>		
			En quoi les masses des éléments constituant un ouvrage sont-elles importantes ?		
	Schéma		Objectif	Montrer l'incidence de la masse sur la période propre de la structure	
			Description du matériel	<table border="1"> <tr> <td>Matériaux</td> <td>Maquettes en tôle d'acier galvanisé ou en zinc, épaisseur 0,5 mm Masse additionnelle avec des ardoises empilées sur des tiges (boulons + écrous) Support en dalle PVC autocollante (3 unités)</td> </tr> <tr> <td>Liaisons</td> <td>Assemblages par petits boulons-écrous en pied Profondeur de l'ensemble : 100 mm</td> </tr> </table>	Matériaux
Matériaux	Maquettes en tôle d'acier galvanisé ou en zinc, épaisseur 0,5 mm Masse additionnelle avec des ardoises empilées sur des tiges (boulons + écrous) Support en dalle PVC autocollante (3 unités)				
Liaisons	Assemblages par petits boulons-écrous en pied Profondeur de l'ensemble : 100 mm				
Manipulation Observation	En statique	Les 2 maquettes (identiques sauf en ce qui concerne la masse additionnelle) sont soumises à une même charge horizontale. Les déformées qui en résultent sont identiques			
	En oscillation libre	Écarter chaque maquette de sa position d'équilibre, puis relâcher. On visualise des oscillations libres très faiblement amorties. La maquette la plus chargée a la période propre la plus grande Possibilité de mesurer cette période propre en chronométrant un certain nombre d'oscillations (aller et retour) ou en filmant cette séquence pour exploiter par la suite les résultats avec le logiciel libre AviMéca			

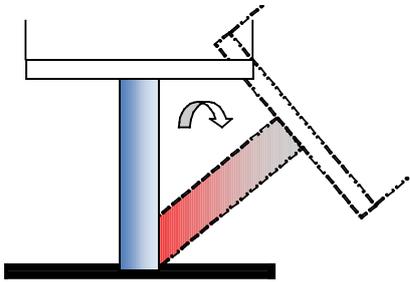


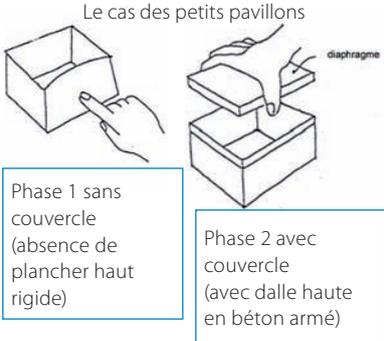
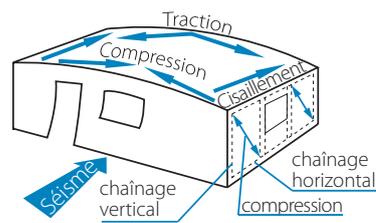
Structures en bois, en béton armé

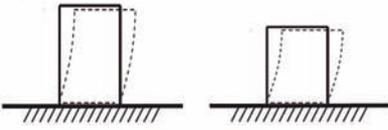
SOURCE : WWW.ARCHITECTES.ORG

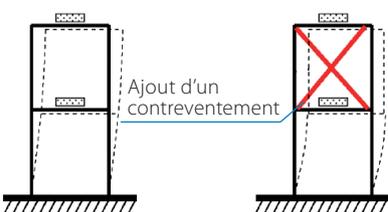
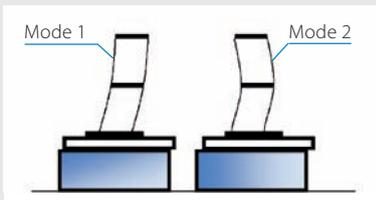


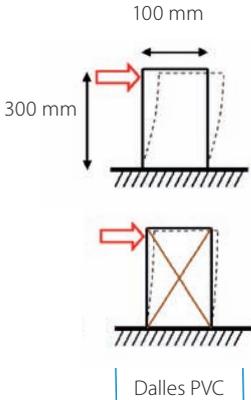
© DENIS GREZES

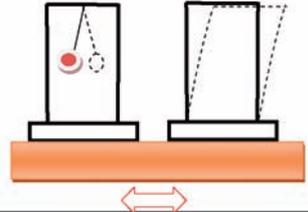
Collège	<b>Manipulation 3.1</b>		<b>Fiche d'observation pour les paramètres de hauteur</b>			
			Pourquoi la hauteur et les masses d'un ouvrage sont-elles importantes ?			
	Schéma			Objectif	Montrer l'incidence de la hauteur ou de la longueur des éléments porteurs sur la rigidité d'une structure	
				Description du matériel	Matériaux	Deux mâts en baguette PVC de section 20 x 1 mm et de 300 mm de longueur Deux gros aimants de diamètre 30 mm (identiques à ceux du tableau de classe)
			Liaisons		Encastrement	
Manipulation Observation	En statique	Écarter chaque mât de sa position d'équilibre, puis relâcher. On visualise des oscillations libres très faiblement amorties. La maquette la plus raide (la moins haute) a la période propre la plus courte				
	En oscillation libre	Possibilité de mesurer cette période propre en chronométrant un certain nombre d'oscillations (aller et retour) ou en filmant cette séquence pour exploiter par la suite les résultats avec le logiciel libre Aviméca				
 <p><b>Renversement par rupture à la base des piles du pont</b></p>						

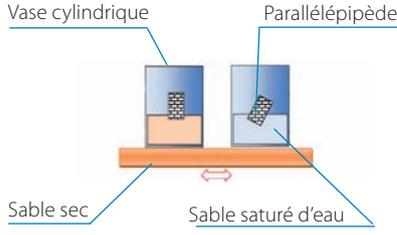
Collège	<b>Manipulation 3.2</b>		<b>Fiche d'observation sur les diaphragmes (planchers)</b>			
			Comment se comporte une structure horizontale du type « plancher » face à une action horizontale ?			
	Schéma	<p>Le cas des petits pavillons</p>  <p>Phase 1 sans couvercle (absence de plancher haut rigide)</p> <p>Phase 2 avec couvercle (avec dalle haute en béton armé)</p>		Objectif	Montrer la stabilité horizontale due aux planchers dans une structure sous l'effet d'une action horizontale appliquée au centre Notion de contreventement	
				Description du matériel	Matériaux	Une boîte à chaussures avec son couvercle représentant un plancher, les 4 cotés verticaux correspondant aux murs classiques d'une habitation
			Liaisons		Maintenir la boîte stable sur la table	
Manipulation Observation	En statique	Présenter la boîte à chaussures sans couvercle et appuyer au centre de la plus grande des surfaces verticales. Effectuer la même opération avec le couvercle en phase 2 qui simule un plancher haut. Constaté les déformations dans les 2 cas et conclure				
 <p><b>Importance des diaphragmes (contreventements horizontaux) dans les constructions</b></p>						

Manipulation 3.3		Fiche d'observation pour les maquettes supportant des hauteurs différentes		
		Pourquoi la hauteur et les masses d'un ouvrage sont-elles importantes ?		
Lycée	Schéma		<b>Objectif</b> Montrer l'incidence de la longueur des éléments porteurs sur la raideur d'une structure et sur sa réponse en cas d'excitation par la base (cas des séismes)	
			<b>Description du matériel</b> <table border="1"> <tr> <td><b>Matériaux</b></td> <td>Maquettes en tôle d'acier galvanisé, épaisseur 0,5 mm Masses additionnelles en tôle d'acier galvanisé, épaisseur 1,5 mm Support en PVC, épaisseur 6 mm</td> </tr> <tr> <td><b>Liaisons</b></td> <td>Assemblages par boulons et cornières</td> </tr> </table>	<b>Matériaux</b>
<b>Matériaux</b>	Maquettes en tôle d'acier galvanisé, épaisseur 0,5 mm Masses additionnelles en tôle d'acier galvanisé, épaisseur 1,5 mm Support en PVC, épaisseur 6 mm			
<b>Liaisons</b>	Assemblages par boulons et cornières			
Lycée	Manipulation Observation	<b>En statique</b>	Les 2 maquettes (identiques sauf en ce qui concerne la longueur des éléments porteurs verticaux) sont soumises à une même charge horizontale. Les déformées qui en résultent sont différentes	
		<b>En oscillation libre</b>	En écartant chaque maquette de sa position d'équilibre, puis en la relâchant, on visualise des oscillations libres très faiblement amorties. La maquette la plus raide (la moins haute) a la période propre la plus courte. Possibilité de mesurer cette période propre en chronométrant un certain nombre d'oscillations (aller et retour)	
		<b>En oscillation forcée</b>	Augmenter progressivement la fréquence jusqu'à la résonance de chaque maquette (amplitude très importante des mouvements), puis dépasser cette fréquence de résonance jusqu'à obtenir la quasi-stabilisation	
<i>Observations :</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Une structure de grande hauteur aura une période plus longue</li> <li>• Une structure de petite hauteur aura une période plus courte</li> </ul> En cas de séisme : <ul style="list-style-type: none"> <li>• lorsque les mouvements du sol sont lents, les structures de grande hauteur vont entrer en résonance</li> <li>• lorsque les mouvements du sol sont rapides, les structures de petite hauteur vont entrer en résonance</li> </ul> La nature du sol – souple ou dur sur plusieurs mètres de profondeur – influe aussi sur les systèmes				

Manipulation 4		Fiche d'observation pour une maquette en oscillateur double		
		Comment se comporte une structure verticale de type portique double face à une action horizontale ?		
Lycée	Schéma		<b>Objectif</b> Montrer qu'une structure à 2 niveaux se comporte comme un oscillateur multiple à 2 degrés de liberté et possède 2 modes propres de vibration	
			<b>Description du matériel</b> <table border="1"> <tr> <td><b>Matériaux</b></td> <td>Maquettes en tôle d'acier galvanisé, épaisseur 0,5 mm Masses additionnelles en tôle d'acier galvanisé, épaisseur 1,5 mm Support en PVC, épaisseur 6 mm</td> </tr> <tr> <td><b>Liaisons</b></td> <td>Assemblages par boulons</td> </tr> </table>	<b>Matériaux</b>
<b>Matériaux</b>	Maquettes en tôle d'acier galvanisé, épaisseur 0,5 mm Masses additionnelles en tôle d'acier galvanisé, épaisseur 1,5 mm Support en PVC, épaisseur 6 mm			
<b>Liaisons</b>	Assemblages par boulons			
Lycée	Manipulation Observation	<b>En statique</b>	Montrer que chaque niveau peut être caractérisé par sa raideur	
		<b>En oscillation libre</b>	Si l'on écarte la maquette de sa position d'équilibre en exerçant une force à son sommet, on visualise en relâchant le 1 <sup>er</sup> mode propre. Si par contre on exerce 2 forces opposées sur chaque niveau, on observe en relâchant le 2 <sup>d</sup> mode de vibration En ajoutant une croix de Saint-André, montrer que les bâtiments avec transparence en RdC (souple en RdC et raide dans les étages) se comportent comme des oscillateurs simples	
		<b>En oscillation forcée</b>	Augmenter progressivement la fréquence pour visualiser successivement le mode 1 et le mode 2 de résonance, puis dépasser ces fréquences de résonance jusqu'à obtenir la quasi-stabilisation   Avec addition de la croix de Saint-André, les modes de vibration sont modifiés	

Tous	<b>Fiche d'observation pour les structures en portique (poteaux-poutres)</b>				
	Manipulation 5 Comment se comporte une structure verticale du type portique face à une action horizontale ?				
	Schéma				
	Manipulation Observation	<table border="1"> <tr> <td style="background-color: #d3d3d3;">En statique</td> <td>Les 2 maquettes (identiques sauf en ce qui concerne la croix disposée dans la seconde) sont soumises à une même charge horizontale. La déformée qui en résulte est différente</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d3d3d3;">En oscillation libre</td> <td>Écarter chaque maquette de sa position d'équilibre, puis relâcher. On visualise des oscillations libres très faiblement amorties. La maquette la plus raide (avec la croix) a la période propre la plus courte Possibilité de mesurer cette période propre en chronométrant un certain nombre d'oscillations (aller et retour) ou en filmant cette séquence pour exploiter par la suite les résultats avec Aviméca</td> </tr> </table>	En statique	Les 2 maquettes (identiques sauf en ce qui concerne la croix disposée dans la seconde) sont soumises à une même charge horizontale. La déformée qui en résulte est différente	En oscillation libre
En statique	Les 2 maquettes (identiques sauf en ce qui concerne la croix disposée dans la seconde) sont soumises à une même charge horizontale. La déformée qui en résulte est différente				
En oscillation libre	Écarter chaque maquette de sa position d'équilibre, puis relâcher. On visualise des oscillations libres très faiblement amorties. La maquette la plus raide (avec la croix) a la période propre la plus courte Possibilité de mesurer cette période propre en chronométrant un certain nombre d'oscillations (aller et retour) ou en filmant cette séquence pour exploiter par la suite les résultats avec Aviméca				

Lycée	<b>Fiche d'observation sur l'amortissement à masse accordée</b>				
	Manipulation 6 Comment se comporte une structure verticale de grande hauteur avec un amortissement en masse accordée ?				
	Schéma				
	Manipulation Observation	<table border="1"> <tr> <td style="background-color: #d3d3d3;">En statique</td> <td>Montrer que les 2 maquettes ont la même raideur La masse ajoutée est elle-même un oscillateur simple</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d3d3d3;">En oscillation forcée</td> <td>Trouver le mode de résonance que l'on veut amortir et comparer alors les 2 maquettes Attention cependant, car en deçà et au-dessus de ce mode on trouvera les modes qui mettent en résonance l'oscillateur double !</td> </tr> </table> <p><i>Observation</i> : Simulons 2 immeubles de même hauteur et de même masse. L'un possède en plus une masse accordée. Sous l'excitation du sol, provoquée ici par la table à secousses, on s'aperçoit que la première maquette d'immeuble équipée de la masse accordée résiste davantage à l'influence des secousses</p>	En statique	Montrer que les 2 maquettes ont la même raideur La masse ajoutée est elle-même un oscillateur simple	En oscillation forcée
En statique	Montrer que les 2 maquettes ont la même raideur La masse ajoutée est elle-même un oscillateur simple				
En oscillation forcée	Trouver le mode de résonance que l'on veut amortir et comparer alors les 2 maquettes Attention cependant, car en deçà et au-dessus de ce mode on trouvera les modes qui mettent en résonance l'oscillateur double !				

Collège	Fiche d'observation sur la liquéfaction de sol		
	Comment se comporte une structure en forme de parallépipède sur un sol liquéfiable ?		
	<p><b>Manipulation 7</b></p>	<p>Vase cylindrique</p> <p>Parallépipède</p>  <p>Sable sec</p> <p>Sable saturé d'eau</p>	<p><b>Objectif</b></p> <p>Montrer le risque de liquéfaction du sol en cas de séisme</p>
<p><b>Manipulation Observation</b></p>	<p><b>En oscillation forcée</b></p>	<p>Pour le sable lâche saturé d'eau, rechercher le basculement et/ou l'enfoncement du bâtiment en augmentant progressivement la fréquence de la table</p> <p>Le bâtiment sur sable sec reste stable</p>	

La liquéfaction est un phénomène qui se produit sous sollicitation sismique. Le passage d'une onde sismique provoque, dans certaines formations géologiques, la perte de résistance d'un matériau sableux saturé d'eau, liée à une augmentation de la pression interstitielle engendrée par les déformations cycliques. La déconsolidation brutale du matériau se traduit par la déstructuration du sol, rendant particulièrement instables les constructions reposant sur ces formations. Le phénomène de liquéfaction concerne certaines formations géologiques peu compactes, définies par leur nature – sables, limons, vases –, leur degré de saturation en eau, leur granulométrie – granulométrie uniforme, comprise entre 0,05 et 1,5 mm

### Exemple de séquences de formation au collège

Niveau 5 <sup>e</sup> « habitat et ouvrages »		
<p><b>Centres d'intérêt</b></p>	<p>Pourquoi un ouvrage ne s'effondre-t-il pas ?</p> <p>Stabilité d'une structure</p> <p>Cette séquence vise à expliquer les principes utilisés pour assurer la stabilité d'une structure. Des maquettes peuvent être faites à titre expérimental pour mesurer l'impact des contraintes dimensionnelles</p>	<p>Comment franchir un obstacle par une voie de passage ou de circulation ? Comment reproduire la structure d'un ouvrage ?</p> <p>Réalisation d'une maquette structurelle</p> <p>Des expérimentations peuvent être conduites sur la maquette pour percevoir la relation entre certains paramètres constructifs : portée et flèche par exemple, variation de température et déformation, prise au vent et déformation, rôle d'un haubanage, rôle d'une clé de voûte...</p>
<p><b>Capacités</b></p>	<p>Mettre en place et interpréter un essai pour définir, de façon qualitative, une propriété donnée</p> <p>Mettre en relation, dans une structure, une ou des propriétés avec les formes, les matériaux et</p>	

SOURCE : ÉDUSCOL, TECHNOLOGIE AU COLLÈGE – RESSOURCES POUR FAIRE LA CLASSE EN 6<sup>e</sup>, 5<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup>, 2009

### Le programme du baccalauréat STI2D

Bulletin officiel spécial n° 3 du 17 mars 2011

#### Enseignements technologiques communs

Approche comportementale	1 <sup>re</sup> /T	Tax	
2.3.4 Structures porteuses			À ne traiter que sous forme expérimentale de manière à faire apparaître le lien entre amplitude des vibrations, fréquence et inertie-raideur du produit. Modélisation du transfert de charges (efforts) dans une structure filaire (de type portique, charpente ou poutres-poteaux). Identification qualitative des sollicitations auxquelles sont soumis les éléments (traction, compression, flexion). Association du type de sollicitations à un choix de matériaux
Aspects vibratoires	T	2	
Transfert de charges	1 <sup>re</sup>	3	

#### Programme de la spécialité architecture et construction

2.3 Modélisations, essais et simulations	ETC <sup>[1]</sup>	1 <sup>re</sup> /T	Tax	Commentaires
<b>On privilégiera une approche expérimentale ou par modélisation numérique</b>				
<p>Étude des structures :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• modélisation, degré d'hyperstaticité, typologie des charges, descente de charges, force portante du sol, sollicitations et déformations des structures</li> <li>• comportement élastique, élastoplastique</li> <li>• rupture fragile, ductilité</li> <li>• coefficients de sécurité</li> <li>• moment quadratique, principe de superposition, répartition des déformations dans une section de poutre soumise à de la flexion simple</li> </ul>	*	1 <sup>re</sup> /T	3	<p>Il s'agit de donner les bases de compréhension de l'équilibre d'une construction. Les conséquences des concepts retenus (isostaticité, hyperstaticité, rigidité, formes, matériaux) sont approchées par une mise en évidence des déformations. La description de l'ensemble des charges auxquelles sont soumises les constructions, leur importance relative ainsi que la visualisation de leur cheminement au sol doivent permettre de justifier les choix constructifs. Les études se font sur la base de comparaison de comportements. S'attacher à mettre en évidence les liens entre caractéristiques des matériaux et sollicitations auxquelles est soumis l'élément structurel étudié.</p>

[1] Un astérisque dans la colonne ETC indique la présence d'un lien avec les enseignements technologiques communs.