

## Document 2.2 : Comment réagit un bâtiment aux séismes ?

<u>Entrée</u> :	Programme de Technologie <sup>1</sup>	Niveau : 5 <sup>ème</sup>
	Pour les documents 2 et 3	
Centres d'intérêts :	<p><b>Pourquoi un ouvrage ne s'effondre t-il pas ?</b> Stabilité d'une structure</p> <p><b>Comment reproduire la structure d'un ouvrage ?</b> Réalisation d'une maquette structurelle.</p> <p>Des expérimentations peuvent être conduites sur bancs d'essais (réalisés ou non par les élèves) ou sur des maquettes didactiques 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 voute...</p>	
Capacités :	Mettre en place et interpréter un essai pour définir, de façon qualitative, une propriété donnée. (2)  <i>Propriétés des matériaux</i>	Mettre en relation, dans une structure, une ou des propriétés avec les formes, les matériaux et les efforts mis en jeu.(2)  <i>Propriétés mécaniques et esthétiques</i>

Entrée « Socle Commun des Compétences <sup>2</sup> » pour le collège.

>>> Document 2

Compétence 3 « Culture scientifique et technologique » <b>en rouge</b> les éléments propres au palier concerné (ici <u>celui du cycle central</u> )		
Réaliser, Manipuler, Mesurer, Calculer...	Suivre un protocole	L'élève suit un protocole donné simple laissant <b>une part d'autonomie</b> , en respectant les règles de sécurité.
	Effectuer une mesure	L'élève <b>lit</b> une mesure avec un instrument <b>simple qu'il connaît</b> .
	Faire un schéma	L'élève <b>fait</b> un schéma, une figure en <b>respectant des consignes</b> .

<sup>1</sup>Eduscol -Collège- Technologie – Ressources pour faire la classe-

<sup>2</sup>Eduscol – Socle commun des connaissances et de compétences – Culture scientifique et technologique -Vade-mecum.

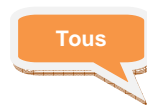
## Préambule :

J'ai souhaité travailler à la fois sur le niveau « collège » et sur le niveau « seconde » de lycée technologique dans le cadre des nouveaux enseignements d'exploration, puisqu'il existe maintenant une continuité logique de l'enseignement de la technologie...

Cela permettra ainsi aux collègues de technologie en collège d'avoir quelques repères et vues supplémentaires dans le domaine du parasismique en fonction des outils fondamentaux dont ils disposeront.

*Certaines notions feront référence au document général*

*Les manipulations seront balisées en fonction des compétences à atteindre au niveau soit du collège ou soit de la seconde de la voie technologique en lycée.*

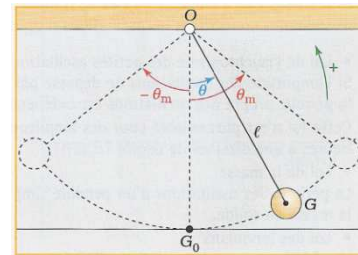
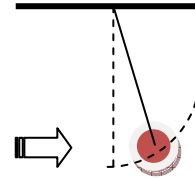
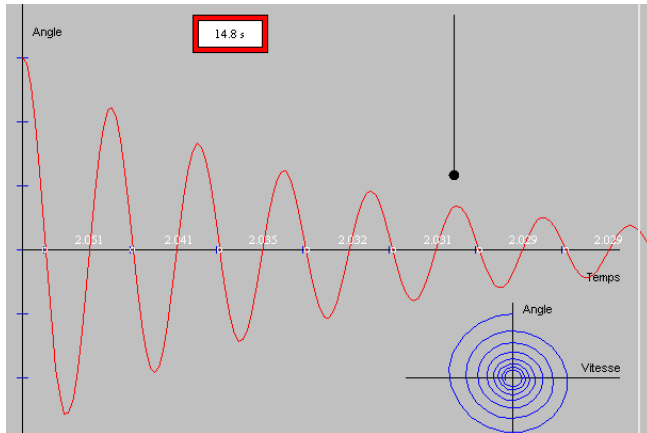


## Maquettes

« Fonctionnement de structure simples sous efforts statiques et dynamiques »

Lycée

- **Oscillateur libre** : Un oscillateur libre c'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. C'est le cas du pendule simple amorti oscillant sous l'effet de la gravité.



Exemple d'une courbe représentant l'amplitude décroissante du pendule avec un angle de départ de 30° et en admettant un amortissement visqueux (frottement).

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  $T_p$  du pendule simple est aussi donnée par la relation :  $T_p = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

$l$  : en mètre (m)

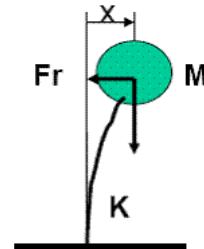
$g$  : intensité de la pesanteur en  $m.s^{-2}$

$T_p$  : en seconde (s)

Considérons maintenant un pendule inversé 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 ( $Fr$ ) qui est proportionnelle à la rigidité ( $K$ ) 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 :

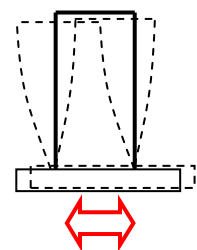
$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$$



- **Oscillateur forcé** : Un oscillateur forcé c'est un oscillateur libre sur lequel s'applique une force de nature périodique. 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 période propre de l'oscillateur. Une balançoire en est un 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 qui correspond à un séisme.

La conjugaison des deux phénomènes : Un ouvrage est forcément toujours sollicité en oscillation forcée durant le séisme puis revient en oscillation libre après les secousses.



Remarque importante !

Tous

Lycée

- **Oscillations multiples** : Un ouvrage de plusieurs étages est considéré comme un oscillateur multiple. L'étude rend d'autant plus complexe l'approche du comportement du bâtiment. Nous n'aborderons pas cette modélisation théorique dans la partie des manipulations.
- **En statique** : la raideur dépend de la longueur des éléments, de l'aire et de la forme de la section, du matériau utilisé et de nature des liaisons (4 paramètres).
- **L'amortisseur** : Un amortisseur est un système destiné à limiter l'amplitude des oscillations forcées transmises par le sol. Il opère par dissipation d'énergie. L'amortissement est une solution favorable pour diminuer les effets destructeurs sur les structures en cas de séisme.

Exemple d'un amortisseur sous un ouvrage en Martinique



Tous

**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. Son inverse est appelé souplesse ou flexibilité.

Ainsi, la raideur, notée  $K$ , exprime la relation de proportionnalité entre la force  $F$  appliquée en un point et la déflexion  $x$  résultante en ce point :

$$K = F/x$$

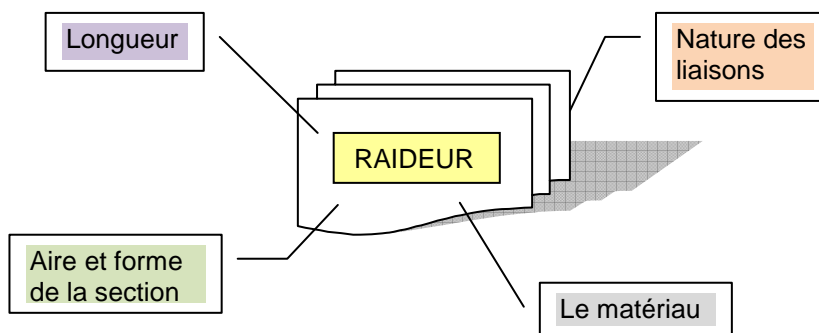


$F$  : est la force appliquée

$x$  : est la déflexion de la structure au point considéré.

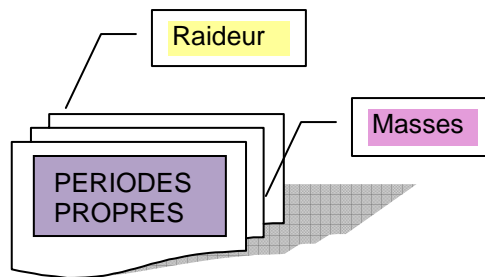
On peut parler de raideur en traction-compression et en flexion. Elles s'expriment en newtons par mètre (N/m).

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 les suivants :



Lycée

La raideur (ou la rigidité) d'un bâtiment et de ses masses constituantes vont permettre d'obtenir les « Périodes propres » de l'ouvrage.



Tous

- **La résonance, Qu'est-ce que c'est ?**

La résonance est un phénomène selon lequel certains systèmes mécaniques sont sensibles à certaines fréquences. Un système résonant peut accumuler une énergie, si celle-ci est appliquée sous forme périodique, et proche d'une fréquence dite « fréquence de résonance » ou « 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).

*Le cas du pont de Tacoma :*

Collège

Du fait d'un 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 qui s'observe facilement sur les photographies extraites du film 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 à 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 sa ruine. Cette explication a été confirmée par plusieurs études en soufflerie depuis les années 40 et ce phénomène aujourd'hui bien connu des concepteurs est systématiquement étudié.

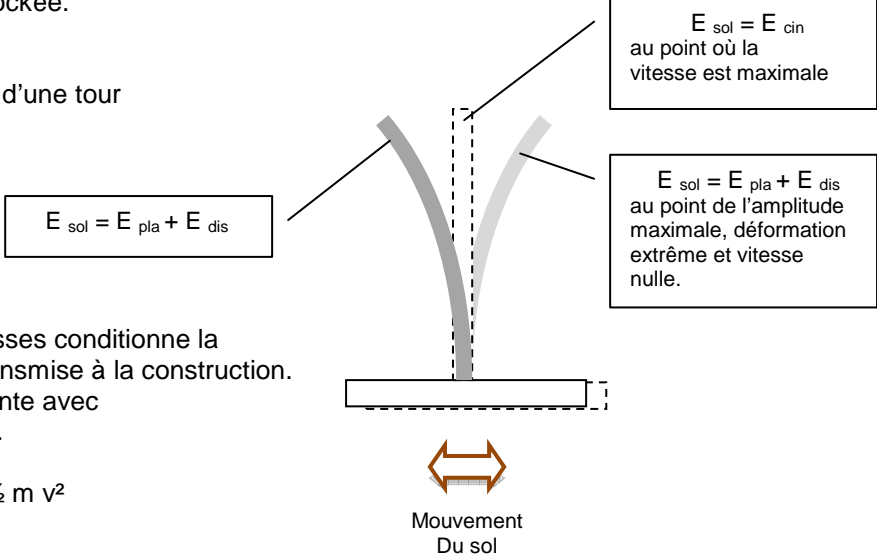


Lycée

• **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. Reste 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.

Equilibre énergétique d'une tour



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

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

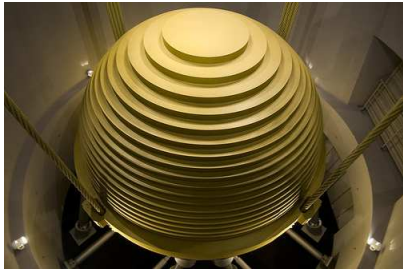
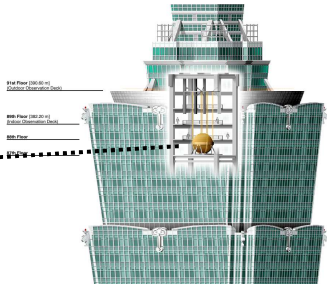
$E_{pla}$  et  $E_{cin}$  se transforment alternativement l'une en l'autre pendant les oscillations. L'énergie cinétique non dissipée se transforme en énergie potentielle stockée.

L'équilibre dynamique s'écrit donc :  $E_{sol} = E_{dis} + E_{pla} + E_{cin}$

*Ce chapitre ne traite pas volontairement les oscillations verticales et de torsions qui existent aussi en parallèle.*

Tous

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



- **Comment minimiser l'action sismique ?**

Pour favoriser la résistance d'une construction aux séismes, on peut minimiser 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 :

- leur résistance mécanique,
- leur capacité à stocker l'énergie, grâce à leurs déformations élastiques, comme un ressort.
- leur 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 des faibles masses. Nous pouvons 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 donne pas lieu à des amplifications désastreuses. Elles 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. Cette réponse est directement liée à la conception même de l'ouvrage.

Globalement, nous avons 3 types de structures :

- Une structure infiniment rigide avec une période propre pratiquement nulle
  - Exemple du blockhaus



On ne parle uniquement que des effets directs et induits

- Une construction ayant une période propre entre 0,1 et quelques secondes.
  - Exemple les maisons courantes et les bâtiments rigides en béton armé.



- Une construction ayant de très longues périodes d'oscillations, supérieure à 5 secondes. (ouvrages souples et flexibles)
  - Exemple des immeubles de grande hauteur.



## ■ Activités : Maquettes

Introduction :

Les maquettes qui vous sont présentées sont des maquettes simples ayant pour but de faciliter l'étude des phénomènes parfois complexes de la dynamique de la structure. Chaque maquette est présentée en statique puis en oscillations libres. Certaines pourraient être présentées par la suite en oscillations forcées en secouant une table ou pourraient être consultées en ligne au travers d'un petit film explicatif mettant en évidence le phénomène recherché.

Les maquettes proposées sont classées en « Oscillateur simple ».

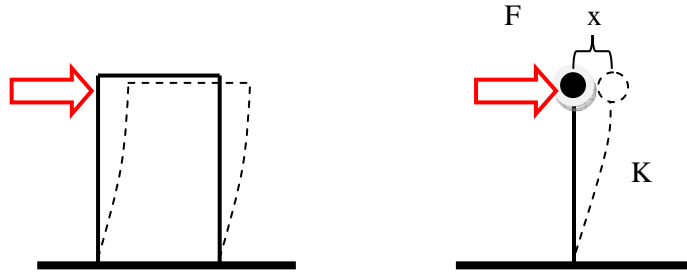
Manipulations proposées au professeur	Maquettes
Les paramètres de sections et de matériaux, la raideur	Manip 2.1.
Les paramètres de masses	Manip 2.2.
Les paramètres de hauteur	Manip 2.3. Manip 2.4.
Le phénomène de liquéfaction des sols	Manip 2.5.



## Les modes d'utilisation des maquettes en forme de portique ou de pendule inversé :

### >>> En statique :

La manipulation consiste à analyser la raideur en réponse à l'application d'un effort constant.



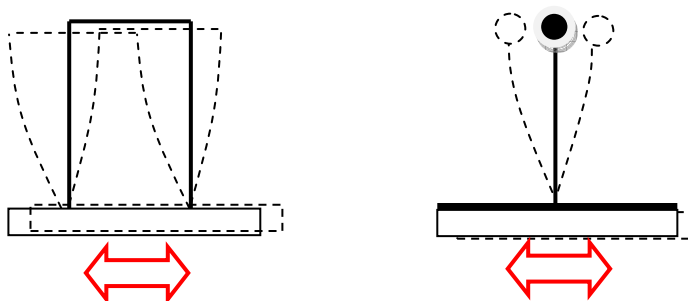
### >>> En dynamique : modes propres :

La réponse de la structure à un séisme dépend de ses modes propres de vibration. Ces modes propres (périodes) de vibrations ne dépendent pas du séisme et peuvent être visualisées lorsque la structure est en oscillations libres (essai au lâcher).



### >>> En dynamique : Oscillations forcées, Résonance :

Après avoir mis en évidence les paramètres de la raideur en statique, puis les paramètres des modes propres en oscillations libres on peut étudier le phénomène de résonance en oscillations forcées (en vue de déterminer la réponse de la structure à un séisme).





Pourquoi existe-t-il des déformations ? Qu'est-ce que la rigidité d'un élément ?

Manip 2.1. Fiche d'observation pour les paramètres de sections et de matériaux		
Schéma		
Description du matériel	<p>Matériaux :</p> <p>Liaisons :</p>	<p>Une table, un pied dans lequel on puisse encastrer des sections de divers matériaux (bois, acier, pvc). Echantillons en lamelle de 200 mm de longueur. Sections géométriques au profil en plat, en tube, en H.</p> <p>1<sup>er</sup> cas : Encastrement rigide de l'échantillon « type étau ».</p>
Objectif		<p>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.</p>
Manipulation Observation	<p><b>En statique</b></p> <p><b>En oscillations libres</b></p>	<p>Il s'agit de mesurer sur le réglet vertical, avec le même poids, les déformations en tête des différents profilés - sections et matériaux différents de même longueur.</p> <p>Il s'agit d'observer l'oscillation en tête de l'échantillon lorsque l'on coupe la ficelle et d'en comparer les amortissements.</p>

En quoi les masses des éléments constituant un ouvrage sont-elles importantes ?

**Manip 2.2. Fiche d'observation pour les paramètres de masse**

Schéma

100 mm

300 mm

Dalles pvc

Remarque : la masse de la construction est en général considérée comme étant concentrée dans les planchers.

Description du matériel	Matériaux :	Maquettes en tôle d'acier galvanisé ou en zinc, épaisseur 0,5mm Masse additionnelle avec des ardoises empilées sur des tiges (boulons + écrous).
	Liaisons :	Support en dalle pvc autocollante (3 unités) Assemblages par petits boulons-écrous en pied. Profondeur de l'ensemble : 100 mm.

Objectif	Montrer l'incidence de la masse sur la période propre de la structure.	
----------	--	--


Manipulation Observation	En statique	Les deux maquettes (identiques sauf en ce qui concerne les masses additionnelles) sont soumises à une même charge horizontale. La déformée qui en résulte est identique.
	En oscillations libres	Ecarter 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 un petit logiciel libre « Aviméca ».

Portiques en structure bois, en béton armé et en métal

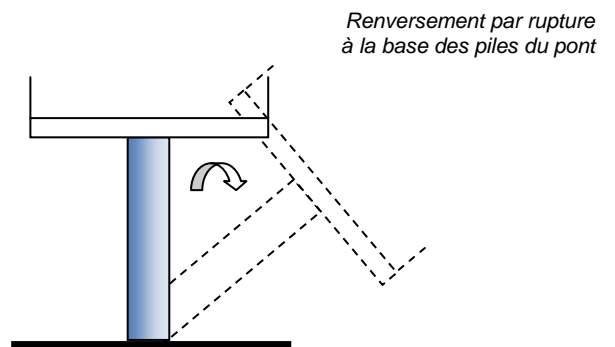


Pourquoi la hauteur et les masses d'un ouvrage sont-elles importantes ?

**Manip 2.3. Fiche d'observation pour les paramètres de hauteur**

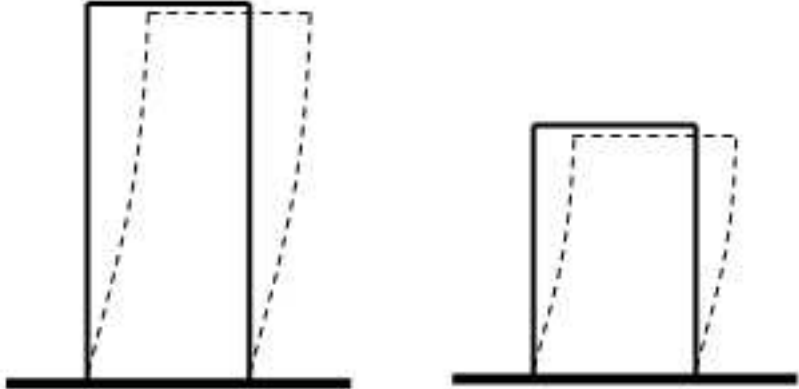
Schéma	 <p style="text-align: center;"><i>Tour de Toronto</i></p>	
Description du matériel	<p>Matériaux :</p> <p>Liaisons :</p>	<p>Mât en baguette pvc de section 20*1 mm de 300 mm de longueur Deux gros aimants de diamètre 30 mm (du type pour tableau de classe)</p> <p>Encastrement.</p>
Objectif	<p>Montrer l'incidence de la hauteur ou de la longueur des éléments porteurs sur la rigidité d'une structure.</p>	
Manipulation Observation	En statique	<p>En déplaçant les aimants le long du mât et en soumettant une même charge horizontale à chaque fois, observer les déformées qui en résulte au droit des aimants.</p>
	En oscillations libres	<p>Ecarter chaque mât de sa position d'équilibre, puis relâcher. On visualise des oscillations libres très faiblement amorties. La maquette du mât 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) ou en filmant cette séquence pour exploiter par la suite les résultats avec Aviméca, un logiciel libre.</p>

Séisme de Kobé en 1995 associant masse et hauteur



## Pourquoi la hauteur et les masses d'un ouvrage sont-elles importantes ?

### Manip 2.4. Fiche d'observation pour les maquettes supportant des hauteurs différentes

Schéma		
Description du matériel	Matériaux : Liaisons :	Maquettes en tôle d'acier galvanisé, épaisseur 0,5mm Masses additionnelles en tôle d'acier galva, épaisseur 1,5mm Support en PVC, épaisseur 6mm Assemblages par boulons et cornières
Objectif	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).	
Manipulation Observation	En statique	Les deux maquettes (identiques sauf en ce qui concerne la longueur des éléments porteurs verticaux) sont soumises à une même charge horizontale. La déformée qui en résulte est donc différente.
	En oscillations libres	En écartant chaque maquette de sa position d'équilibre, puis en 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).
	En oscillations forcées	>> Avec une table vibrante  En augmentant progressivement la fréquence jusqu'à la résonance de chaque maquette (amplitude très importante des mouvements) puis en dépassant cette fréquence de résonance jusqu'à obtenir sa quasi stabilisation.

### Manip 2.4. Fiche d'observation pour les maquettes supportant des hauteurs différentes



Observations :

Une structure de grande hauteur aura une période plus longue.  
Une structure de petite hauteur aura une période plus courte.

En cas de séisme :

- Lorsque les mouvements du sol sont lents, les structures de grandes hauteurs vont rentrer en résonance.
- Lorsque les mouvements du sol sont rapides, les structures de petites hauteurs vont rentrer en résonance.

La nature du sol influe aussi sur les systèmes ; selon que le sol soit souple ou soit dur sur plusieurs mètres de profondeur.



Mouvement du sol lent, les immeubles de grandes hauteurs sont plus fragiles.



Mouvement du sol rapide, les petits habitats sont à leur tour les plus fragiles.

## Comment se comporte une structure en forme de parallélépipède sur un sol liquéfiable ?

Explication :

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 en 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, définies par leur nature : sables, limons, vases, leur cohésion : formations peu compactes.

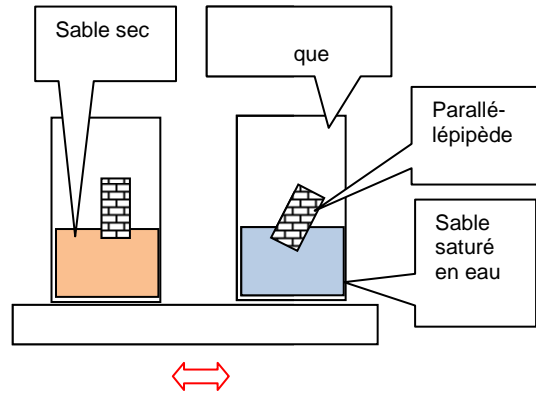
Leur degré de saturation en eau : la formation doit être saturée en eau.

Leur granulométrie : granulométrie uniforme, comprise entre 0,05 et 1,5 mm.

### Fiche Manip 2.5.

Manip 2.5.		Fiche d'observation sur la liquéfaction de sol	
Schéma			
Description du matériel	Matériaux :	Boite en plexiglas transparent à deux compartiments Support en PVC Sable Eau Cylindre en acier (bâtiment rigide)	
Objectif	Montrer le risque de liquéfaction de sol en cas de séisme.		
Manipulation Observation	En oscillations forcées	Pour le sable lâche saturé en eau rechercher le basculement et/ou l'enfoncement du bâtiment en augmentant progressivement la fréquence de la table.  Le bâtiment sur sable sec reste stable	

**Manip 2.5.** Fiche d'observation sur la liquéfaction de sol



Séisme de Niigata (Japon) 1964

Effets de la liquéfaction des sols sur les constructions lors d'un tremblement de terre.



Image source AQM



Référence: Certains éléments du document sont extraits d'une formation nationale organisée par le CERPET en coopération avec le MEEDAT en 2007-2008 à partir des supports de Milan Zacek et Gérard Hivin. Ces éléments ont été partiellement ou volontairement modifiés pour les adapter au niveau des collégiens et des lycéens au niveau de la seconde technologique du module d'exploration Sciences de l'Ingénieur.

Le risque sismique en France, Collection les enjeux des Géosciences - BRGM éditions, 2009  
Cours de « Génie parasismique », par J. Mazars, Institut Polytechnique de Grenoble.