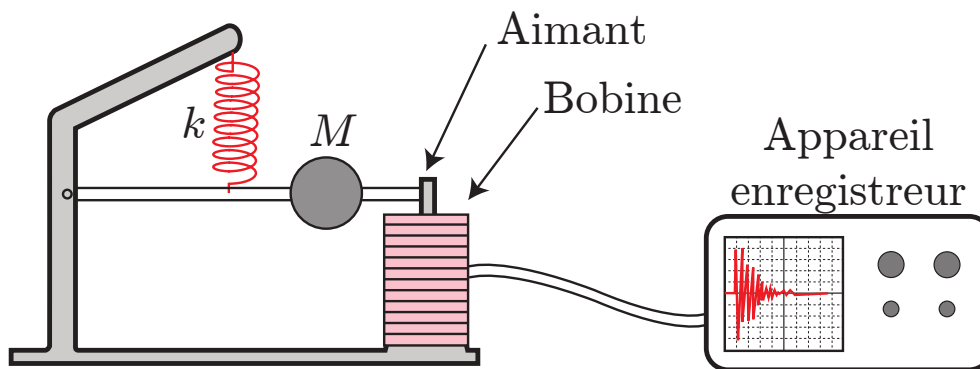


## DM 12 – Étude et modélisation d'un sismomètre

**Objectif :** Expliquer la nature du filtrage introduit par un dispositif mécanique.

La surveillance des mouvements du sol dus à la sismicité est importante car elle permet de détecter l'apparition de phénomènes dont les conséquences peuvent être tragiques (tremblements de terre, tsunamis...). Dans les cas où la détection est trop tardive pour permettre une alerte efficace, les enregistrements peuvent tout de même être utilisés à posteriori pour mieux comprendre la nature de l'événement et tenter d'anticiper les prochains. L'appareil incontournable pour suivre les mouvements du sol est le sismomètre, et on se propose ici d'en décrire le principe de fonctionnement comme illustration d'une application pratique de filtrage.



Un sismomètre est un appareil capable de détecter de très petits mouvements du sol et de les enregistrer, analogiquement ou numériquement, en suivant une base de temps très précise. Il fonctionne sur le même principe qu'un oscillateur amorti. L'enregistrement du mouvement de la masse en fonction du temps correspond au sismogramme. Un sismomètre est constitué d'un oscillateur mécanique ; l'excitation de cet oscillateur étant due aux mouvements du sol. Les mouvements de la partie mobile engendrent un courant électrique dans un bobinage, ce qui a deux effets importants :

- amortir les oscillations mécaniques et éviter donc une prolongation excessive du mouvement après une excitation brève ;
- fournir un signal électrique qui peut être aisément amplifié, enregistré et transmis.

Le mouvement du sol  $x_{\text{sol}}(t)$  est lié au mouvement de la masse décrit par  $s(t)$  par l'équation suivante, caractéristique des oscillateurs amortis :

$$\ddot{s} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{s} + \omega_0^2 s = A \ddot{x}_{\text{sol}}, \quad (1)$$

où  $Q$  est le facteur de qualité du système,  $\omega_0$  est la pulsation propre de l'oscillateur et  $A$  est l'amplification.

Vu la forme du second membre, on peut remarquer que déplacer le sismomètre à vitesse constante n'engendre aucune détection : ce sont les accélérations qui provoquent une réponse. Un sismomètre est donc simplement un accéléromètre.

Un sismomètre est le plus souvent protégé par un bâti lié au sol, dans lequel la masse du capteur peut osciller en cas de sollicitation sismique. L'appareil doit être autant que possible isolé de l'extérieur, afin que les variations de température ou de pression n'affectent pas la stabilité du système. Lorsque le sol bouge, le bâti qui est solidaire au sol bouge aussi, ce qui provoque un mouvement relatif entre la masse et le bâti qui porte également le système d'enregistrement. Ce mouvement relatif est amplifié, puis enregistré.

Par ailleurs, les ondes sismiques qui génèrent les oscillations du sol peuvent avoir des polarisations, c'est-à-dire des directions de vibrations diverses que l'on peut décomposer suivant les trois dimensions qui définissent notre environnement : on considère donc en général une verticale et deux horizontales. Selon l'orientation des oscillations de la masse, certains sismomètres sont alors sensibles aux mouvements "horizontaux" du sol et d'autres aux mouvements "verticaux" du sol. Pour mesurer complètement les mouvements du sol, une station sismologique doit alors contenir trois composantes : un sismomètre vertical et deux horizontaux, afin d'obtenir une bonne restitution des vibrations du sol en trois dimensions. Il existe en réalité également des sismomètres capables d'enregistrer plusieurs composantes à la fois (trois composantes orthogonales).

Un sismomètre ne doit pas privilégier de fréquence : il ne doit pas y avoir de phénomène de résonance. Le choix du sismologue est donc de se rapprocher juste en dessous de l'amortissement critique pour que l'oscillation repasse par zéro rapidement. Comme la masse revient assez vite vers sa position d'équilibre, elle est prête pour réagir à l'arrivée du train d'onde suivant. Le sismologue doit tenir compte de l'environnement d'où une large gamme de sismomètres dont les caractéristiques varient sensiblement. Diverses causes vont contribuer à mettre en oscillation le sol et vont donc intervenir dans la réponse du sismomètre. Exemples :

- phénomènes de marée (période : demi-journée,  $10^{-5}$  Hz),
- perturbations liées à l'activité humaine, qu'il s'agisse de la circulation de véhicules, de travaux de terrassement lors de constructions...
- la houle, qui est un train régulier de vagues formées au large, est également un phénomène périodique auquel vont être sensibles les sismomètres verticaux (périodicité de quelques secondes à quelques dizaines de secondes).

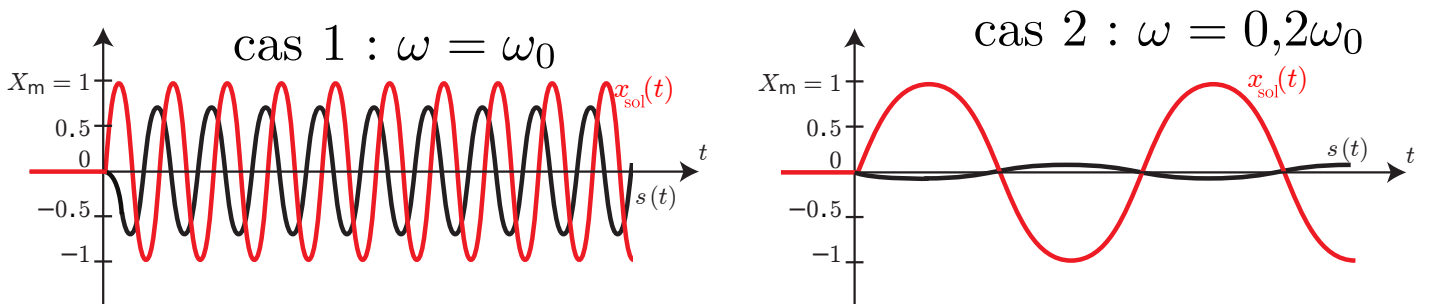
La prise en compte de l'environnement permet au sismologue de définir dans quel intervalle spectral se situe l'information utile et il définit la bande passante des sismomètres à utiliser.

### Examen d'oscillogrammes tests :

On poursuit l'étude par l'examen d'un oscillogramme correspondant à un signal test usuel dans le domaine de la sismologie : le train d'onde. Le signal  $x_{\text{sol}}(t)$  correspondant est représenté ci-dessous :

- il est nul aux instants négatifs ;
- puis il oscille à la pulsation  $\omega$  à partir de  $t = 0$ , avec l'expression  $x_{\text{sol}}(t) = X_m \sin(\omega t)$  (on considère donc une seule composante harmonique).

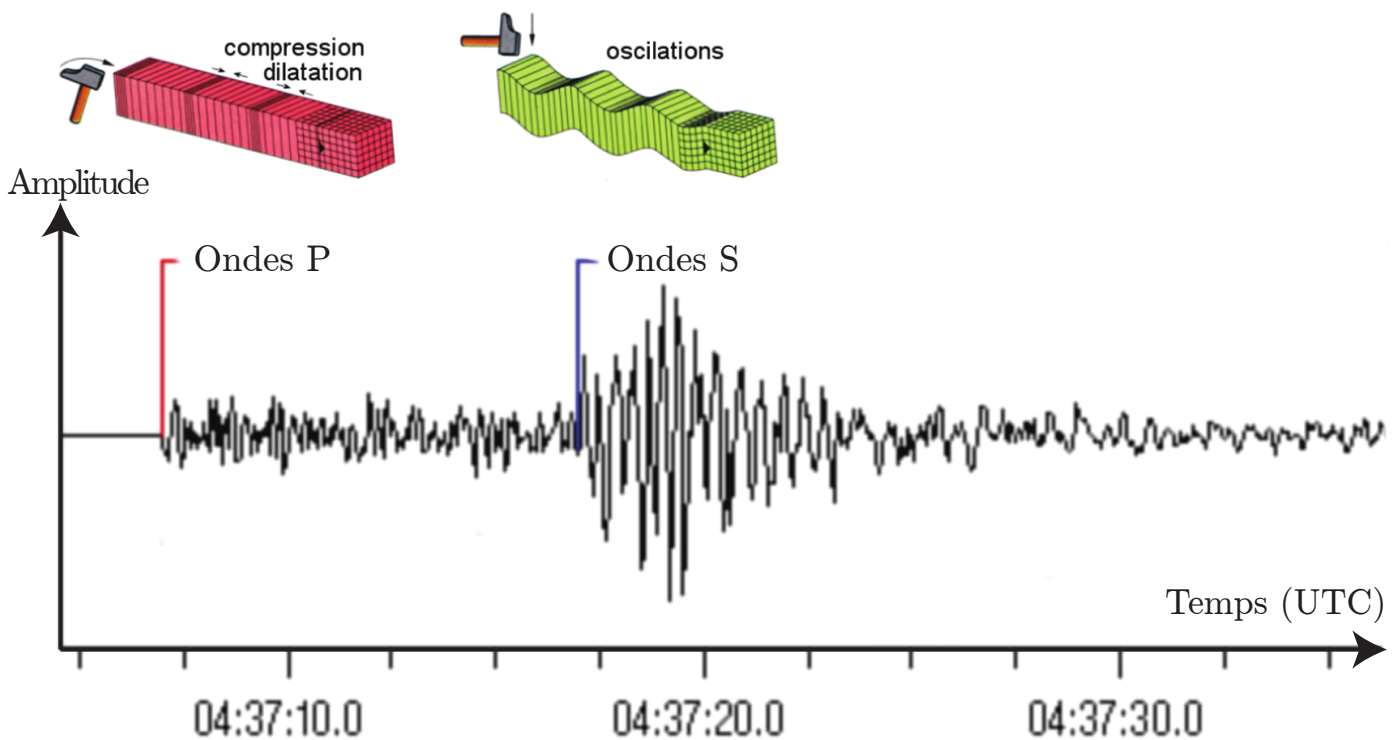
Comparons les réponses simulées pour la valeur  $Q = 1/\sqrt{2}$  et différentes pulsations d'excitation (les ordonnées sont en unités arbitraires :  $X_m = 1$ ) :



## Applications aux ondes sismiques :

Les ondes sismiques sont des ondes mécaniques. Les vibrations engendrées par un séisme se propagent dans toutes les directions. On distingue les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent parallèlement à sa surface. On ne considère par la suite que les ondes de volume. Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et d'une manière générale elle augmente avec la profondeur. L'onde P, ou onde primaire est, comme son nom l'indique, l'onde qui arrive la première, elle est aussi appelée onde de compression ou onde longitudinale. Le déplacement du sol qui accompagne son passage se fait par dilatation et compression successives, parallèlement à la direction de propagation de l'onde. C'est la plus rapide (environ 6,15 km/s près de la surface). Elle est responsable du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre. C'est cette onde qui sonne l'alerte du tremblement de terre, mais ce n'est pas la plus dangereuse.

En effet c'est l'onde S secondaire qui arrive quelques secondes plus tard qui est plus destructrice car elle est transversale et non longitudinale comme l'onde P. À son passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Cette onde ne se propage pas dans les milieux liquides, elle est en particulier arrêtée par le noyau liquide de la Terre. Sa vitesse est plus lente que celle des ondes P (environ 3,6 km/s).



## Questions :

- 1 - À partir de l'équation du mouvement, établir l'expression de la fonction de transfert  $\underline{H}(\omega) = \frac{\underline{s}}{\underline{x}_{\text{sol}}}$  du sismomètre.
- 2 - De quel type de filtre s'agit-il? Quel est son ordre?
- 3 - Donner l'allure du diagramme de Bode du sismomètre (en amplitude et en phase). On admet qu'il y a une résonance pour  $Q$  assez grand : tracer un cas avec résonance et un cas sans résonance.
- 4 - Comment faut-il choisir le facteur de qualité d'un sismomètre?
- 5 - Comparer  $x(t)$  et  $s(t)$  sur l'oscillogramme correspondant à  $\omega = \omega_0$ . Les résultats sont-ils en accord avec la théorie? (en terme d'amplitude et de déphasage)
- 6 - Même question pour l'oscillogramme correspondant à  $\omega = 0,2\omega_0$ .
- 7 - Comment pourra-t-on distinguer les ondes de type P et de type S sur un oscillogramme?
- 8 - Donner un ordre de grandeur de la fréquence de l'onde S à partir du sismogramme présenté dans le document.  
En déduire une contrainte sur la pulsation propre du sismomètre. Avec ce choix, le sismomètre sera-t-il sensible aux perturbations des marées et de la houle?
- 9 - Trouver la distance entre l'épicentre et le sismomètre dans le cas du sismogramme présenté dans le document.