

VIII-2 – Approche documentaire

Le sismomètre

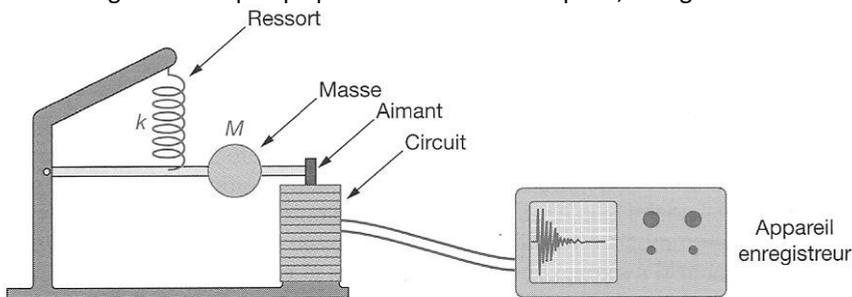
La surveillance des mouvements du sol dus à la sismicité sont importants, dans la mesure où ils permettent de détecter l'apparition de phénomènes dont les conséquences peuvent être tragiques (tremblements de terre, tsunamis...). La détection est parfois trop tardive pour permettre une alerte efficace, les enregistrements sont alors utilisés a 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, on se propose ici d'en décrire le principe de fonctionnement comme illustration d'une application pratique de filtrage.

Document 1 : Fonction d'un sismomètre

Un sismomètre est un capteur qui permet la détection et l'enregistrement des mouvements, à une dimension, de la surface sur laquelle il repose. Comme on souhaite en général disposer de la mesure du mouvement à 2 ou 3 dimensions du sol, on place plusieurs sismomètres selon différents axes orthogonaux et on reconstitue, à partir de leurs enregistrements, le mouvement multidimensionnel effectif.

Un sismomètre est constitué d'un résonateur 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.



Document 2 : Modélisation du sismomètre

Tous les phénomènes en jeu sont linéaires : l'équation différentielle est donc de type linéaire à coefficients constants, les valeurs de ceux-ci étant en effet liés aux différents paramètres du système (masse, constante de raideur...), qui ne varient pas dans le temps.

Le phénomène étant principalement dû à la mise en oscillation d'un ensemble mécanique, l'équation qui le régit est du second ordre. D'autre part, l'absence de vibration du sol, c'est-à-dire le

cas où $x(t)$ ne varie pas, n'engendre aucune réponse du dispositif, on peut donc exclure un comportement passe-bas.

De la même manière, déplacer le sismomètre à vitesse constante n'engendre aucune détection : ce sont les accélérations qui provoquent une réponse. Dans le même ordre d'idée, un passager qui se déplace dans un train roulant à vitesse constante ne ressent aucun effet physiologique. **Un sismomètre est un accéléromètre.**

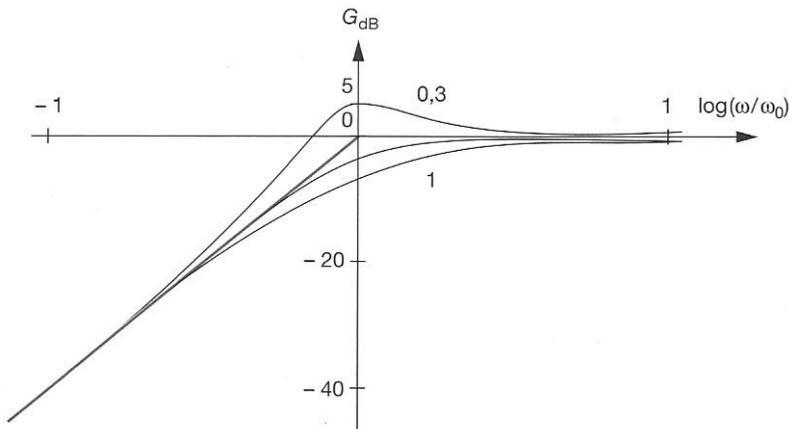
On en déduit que c'est la dérivée seconde du signal $x(t)$ qui sert d'excitation au système, ce qui se traduit par l'expression suivante :

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = H_0 \frac{d^2e}{dt^2} \Leftrightarrow \underline{H} = H_0 (jx)^2 \frac{1}{1 + j \frac{x}{Q} - x^2}$$

Le comportement du sismomètre est celui d'un filtre passe-haut du second ordre.

On adoptera dans la suite $H_0 = 1$, ce qui revient à effectuer une mise à l'échelle.

D'un point de vue fréquentiel, le diagramme de Bode en gain, est le suivant :



Document 3 : Choix des paramètres

Le concepteur du sismomètre doit définir les valeurs à donner aux deux paramètres ω_0 et Q . Il adopte alors deux critères liés au domaine d'application :

- La bande passante doit correspondre à la gamme de fréquence des vibrations sismiques à détecter. En corollaire, les perturbations d'un autre type doivent si possible être éliminées par filtrage ;
- Le comportement du sismographe ne doit pas privilégier de fréquence : il ne doit donc pas y avoir de résonance. Le second critère fixe la valeur du coefficient d'amortissement : on adopte en pratique un amortissement critique :

Pour ce qui concerne la bande passante, le sismologue doit tenir compte de l'environnement qui est le sien. Les constructeurs proposent de ce fait une large gamme de sismomètres, dont les propriétés caractéristiques varient sensiblement.

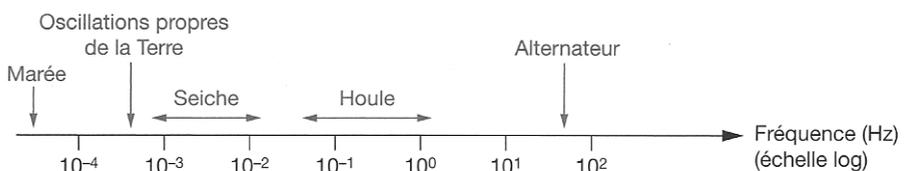
En vue d'illustrer la démarche, on raisonne ici sur un exemple : la surveillance sismique d'un site nucléaire situé en bord de mer. La catastrophe de Fukushima a montré combien les catastrophes

géophysiques pouvaient avoir des conséquences redoutables lorsqu'elles affectaient des sites hébergeant des centrales nucléaires.

Diverses causes vont contribuer à mettre en oscillations le sol et vont de ce fait intervenir dans le fonctionnement des sismomètres. Certaines sont des parasites que le concepteur souhaite ne pas détecter, d'autres sont vues comme signal porteur d'information utile. Chacune doit donc être définie par ses propriétés spectrales, afin de permettre un choix judicieux de la bande passante du capteur. Citons quelques-unes de ces causes, sans prétendre toutefois à l'exhaustivité

- Les phénomènes de *marée*, dus à l'attraction de la Lune et du Soleil, interviennent de manière périodique (une demi-journée ou une journée selon la localisation à la surface du globe) ;
- La *houle*, qui est un train régulier de vagues formées au large, est également un phénomène périodique auquel vont être sensibles les sismomètres verticaux. En effet, bien que n'existant qu'à la surface de l'eau, ces vagues exercent une action par gravité sur le fond marin ; les sismomètres ultrasensibles détectent alors une oscillation dont la périodicité va de quelques secondes à quelques dizaines de secondes ;
- D'autres phénomènes périodiques plus insolites se révèlent dans ces expériences de sismologie extrêmement sensible : l'oscillation propre de la Terre, d'une période de 53 minutes et l'oscillation propre de certaines baies ou lacs fermés (mouvements de *seiches*) de quelques dizaines de minutes de période ; - à proximité d'une installation industrielle, les perturbations liées aux activités humaines interviennent de manière importante, qu'il s'agisse de la circulation de véhicules, de travaux de terrassement lors de constructions. Ces causes ont un spectre étendu, de caractéristiques variables, ce qui rend parfois délicate leur identification. Plus simplement, dans le cadre du fonctionnement d'une centrale électrique, la rotation des alternateurs (machines convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique) s'effectue à vitesse constante. À raison de 3 000 tours par minute par exemple, une fréquence de 50 Hz apparaît, que vont détecter les dispositifs très sensibles situés à proximité.

Un diagramme spectral permet de situer quelques-uns des domaines fréquentiels liés à ces diverses causes.

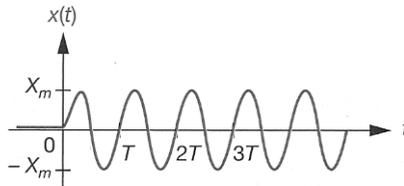


La surveillance sismique est bien entendu réalisée par la détection de vibrations éventuelles du sol, qui relèvent de la sismologie proprement dite. L'étude géophysique définit diverses ondes se propageant soit à la surface du sol, soit dans le volume de la croûte terrestre. Certaines engendrent des vibrations verticales, d'autres horizontales. Selon le modèle approprié, le sismologue peut définir dans quel intervalle spectral se situe l'information utile, il définit alors la bande passante des sismomètres à utiliser. Le diagramme le renseigne sur les causes parasites qui vont entacher la mesure d'un bruit ; il restera à discriminer signal et parasite.

Dans le cas où les sismomètres ont une période caractéristique de l'ordre de la seconde, c'est-à-dire que la fréquence de coupure f_0 est de l'ordre du hertz, on conçoit que la houle va être détectée par le capteur, de même que l'oscillation à 50 Hz des machines. En revanche, il est probable que les phénomènes de marées ou l'oscillation propre de la Terre pourront être facilement éliminés.

Document 4 : Examen d'oscillogrammes tests

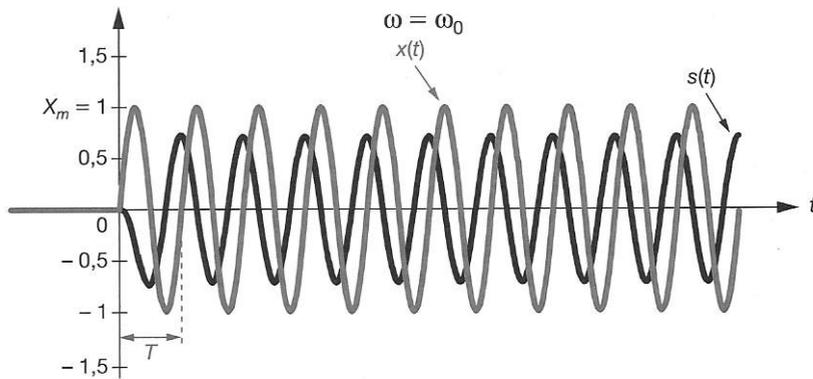
On poursuit l'étude par l'examen d'un oscillogramme correspondant à un signal test usuel dans le domaine de la sismologie : le train d'onde.



Pour éviter une discontinuité peu réaliste dans le cadre de phénomènes sismiques, on adopte l'expression : $x(t) = X_m \sin(\omega_0 t)$.

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

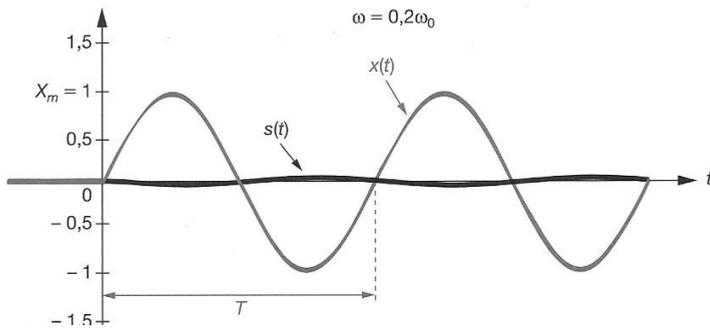
a) Si $\omega = \omega_0$



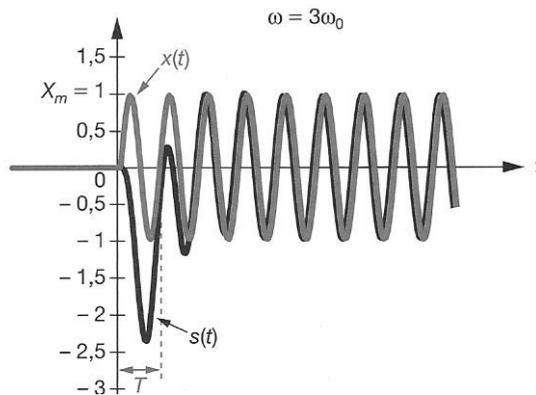
On constate qu'après un bref régime transitoire, le signal de sortie oscille avec la même pulsation que l'excitation, mais en quadrature de phase

a) Si $\omega = 0,2 \omega_0$

La réponse présente une amplitude très faible : le signal est en dehors de la bande passante.



b) Si $\omega = 3\omega_0$



La fréquence d'excitation est dans la bande passante : en effet, après amortissement du régime transitoire, le signal reflète quasi fidèlement l'oscillation d'excitation. Le très léger déphasage tient à ce que ω n'est pas très supérieur à ω_0 .

On note par ailleurs que, du fait du caractère passe-haut, le système réagit fortement à l'apparition de la première oscillation : le début de la réponse est excessif, puis l'amortissement dû au choix du facteur Q permet d'atteindre le régime établi, d'amplitude appropriée.

Questions :

- Les fréquences des ondes sismiques varient entre 0,5 et 15Hz, quelle fréquence propre proposait vous pour le sismographe pour éviter les parasites dans cette zone.
- Quel est le parasite, le plus gênant pour notre type de filtre ?
- Pourquoi le signal oscille en quadrature de phase dans le cas où $\omega = \omega_0$.
- Pourquoi a-t-on choisi un filtre peu sélectif avec $Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$?