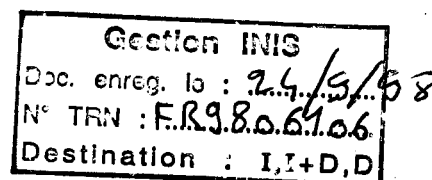




SOLIDES - STRUCTURES ET SYSTEMES MECANIKUES

Diplôme d'Etudes Approfondies

Eric LOPES



Mémoire de stage réalisé au :

DMT/SEMT/EMSI
CEA Saclay

Sous la direction de :
Pierre SOLLOGOUB
et
Ioannis POLITOPOULOS

Sujet :

**Etude de la Vulnérabilité des Structures sous
Séismes Proches et Lointains**

Soutenu le :
26 Juin 1998

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement mon maître de stage P.SOLLOGOUB. Je remercie également I.POLITOPOULOS pour ses précieux conseils techniques et pour le temps mis à ma disposition.

Je tiens également à remercier toutes les personnes du laboratoire EMSI pour leur bonne humeur et leur disponibilité dans le travail.

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1:

Listing des programmes:

- Normalisation des accélérogrammes
- Calcul des spectres élastiques
- Calcul des spectres inélastiques
- Calcul des courbes enveloppes

Annexe 2 :

Courbes :

- Spectres inélastiques en pseudo-accélération pour différents modèles.
- Rapport des spectres inélastiques sur élastiques pour différents modèles.

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION	2
II. SEISMES PROCHES ET LOINTAINS.....	3
A. DIFFÉRENCES ENTRE SÉISME PROCHE ET LOINTAIN.....	3
B. SÉISMES ÉTUDIÉS	4
III. SPECTRES INELASTIQUES.....	6
A. RAPPELS SUR LES SPECTRES ÉLASTIQUES	6
B. RÔLE DE LA DUCTILITÉ.....	8
C. MODÈLES NON LINÉAIRES UTILISÉS (1 D)	9
1. <i>modèle élasto-plastique parfait</i>	9
2. <i>modèle élastique non linéaire</i>	9
3. <i>modèle élasto-plastique avec écrouissage cinématique</i>	10
4. <i>modèle de Takéda</i>	10
D. NOTION DE SPECTRE INÉLASTIQUE.....	12
1. <i>Ductilité admise, ductilité appelée</i>	13
2. <i>Accélération quelconque</i>	14
3. <i>Remarques sur l'utilisation des spectres inélastiques</i>	15
E. CALCULS EFFECTUÉS	17
1. <i>Comparaison entre les différents modèles</i>	17
2. <i>Importance et rôle de la ductilité</i>	18
3. <i>Gain par rapport au spectre élastique</i>	18
4. <i>Essai sur deux oscillateurs en série</i>	21
F. CRITÈRES DE NOCIVITÉ.....	26
1. <i>Durée du séisme</i>	26
2. <i>Notion de cycles</i>	27
IV. CONCLUSION	29

I. INTRODUCTION

Actuellement, selon la règle fondamentale de sûreté éditée par l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, les structures parasismiques sont dimensionnées pour résister aux séismes probables pour le site. Ces séismes peuvent être proches ou lointains.

Les outils de dimensionnement classiques, comme l'analyse linéaire d'un spectre de réponse élastique d'oscillateur montrent que les séismes proches sont plus agressifs pour les structures.

Cependant, le retour d'expérience tend à prouver l'inverse. Le but de ce stage est donc d'établir dans la mesure du possible une comparaison de la « nocivité » entre les séismes proches et les séismes lointains. Il a donc fallu trouver d'autres critères de comparaison, prenant en compte de nouveaux paramètres, pour corrélérer les retours d'expérience.

Dans un premier temps, nous expliciterons la différence entre les séismes proches et lointains. Puis, après l'énoncé des limites des outils actuels de dimensionnement, nous définirons les nouveaux moyens de calcul ainsi que leurs résultats. Ces nouvelles méthodes portent sur la prise en compte du caractère inélastique des structures.

II. SEISMES PROCHES ET LOINTAINS

A. Différences entre séisme proche et lointain

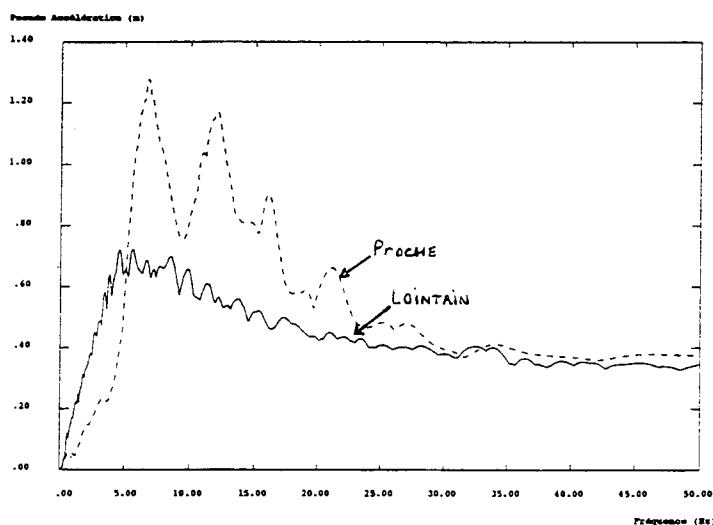
On appelle séisme proche, un séisme dont l'épicentre est situé à moins de 10 km de la structure considérée. De ce fait, un même séisme peut être proche pour un site et lointain pour un autre. Cependant, dans le « jargon » parasismique, cette définition est également associée à d'autres paramètres comme la magnitude, le *contenu fréquentiel*, le niveau d'accélération...

Un séisme proche a une faible magnitude, de l'ordre de 4 à 5 (sur l'échelle de Richter), une distance focale et une profondeur inférieures à 10 km. On parle également, pour les séismes proches, d'un *contenu fréquentiel* plus important et riche en hautes fréquences. Ce *contenu fréquentiel* peut être estimé par A/V avec A l'accélération maximale du sol et V la vitesse maximale. Un séisme proche a des valeurs de $A/V \gg 10$.

Les autres critères, lisibles sur l'accélérogramme (accélération du sol en fonction du temps pour un séisme donné), concernent :

- ⇒ Les niveaux d'accélération (ou pics), plus élevés pour les séismes proches,
- ⇒ Le nombre de cycles plus faible pour les séismes proches,
- ⇒ La durée du séisme, plus courte (de l'ordre de 2 à 5 secondes) pour ces mêmes séismes.

Tous ces critères permettent de différencier les deux types de séisme considérés, même si la distinction est parfois difficile à effectuer. Le dernier outil de comparaison (qui sera défini au chapitre suivant) est le spectre de réponse d'oscillateur élastique ou SRO. Il traduit également certains des critères énoncés précédemment. Nous prendrons comme exemple le spectre en pseudo-accélération (utilisé pour le dimensionnement), qui traduit la pseudo-accélération maximale de l'oscillateur, en fonction de sa pulsation propre, soumis à un séisme donné.



- Spectre d'oscillateur à 5% des séismes de Nice (0.25g) et San Francisco (0.25g x 1.5)

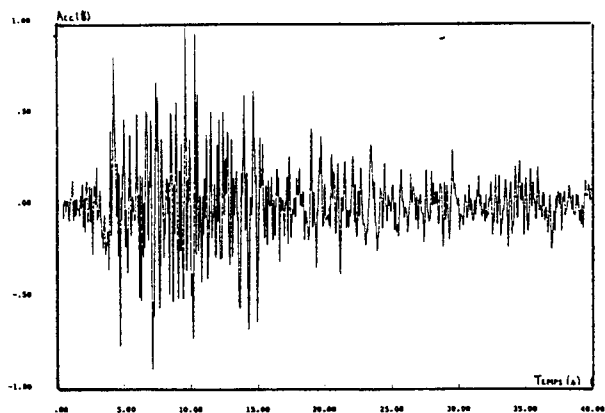
On remarque que le séisme proche a bien des pics d'accélération supérieurs à ceux du séisme lointain et ce pour des fréquences un peu plus élevées.

On comprend donc, à supposer que le spectre de réponse d'oscillateur est un bon critère de dimensionnement, pourquoi les structures parasismiques sont dimensionnées pour les séismes proches.

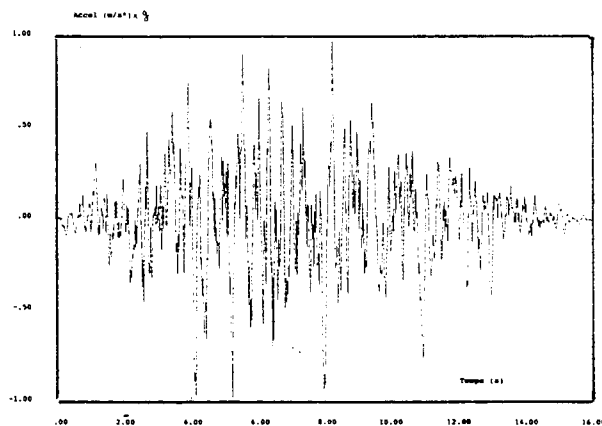
B. Séismes étudiés

Pour notre étude, nous avons à notre disposition 6 séismes, ou plutôt 6 accélérogrammes. Deux d'entre eux sont des séismes lointains, Taft et Nice, les quatre autres, Ancona, Melendy, San Francisco et Gamao sont considérés comme proches.

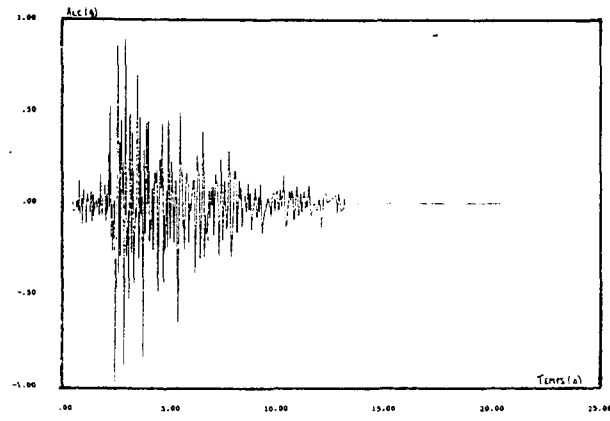
Pour une meilleure comparaison des séismes proches et lointains, nous avons normé ces accélérogrammes à 1g. Les courbes suivantes représentent donc les accélérations imposées au sol au cours du temps par les séismes dits.



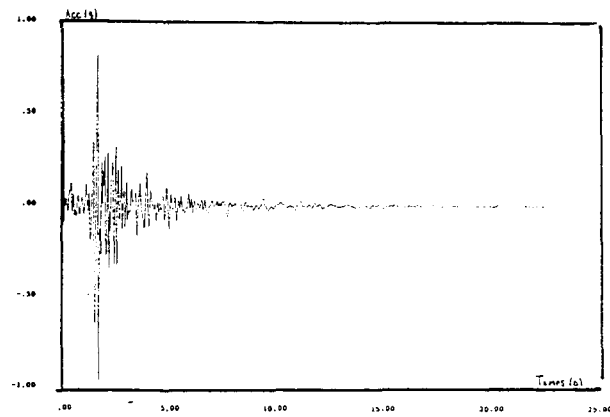
Accélérogramme normalisé Taft



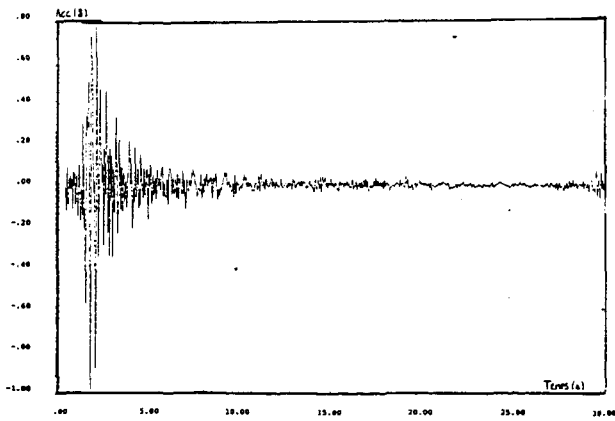
Accélérogramme Normalisé de Nice



Ampliogramme de l'accélération



Ampliogramme de l'accélération



Ampliogramme de l'accélération

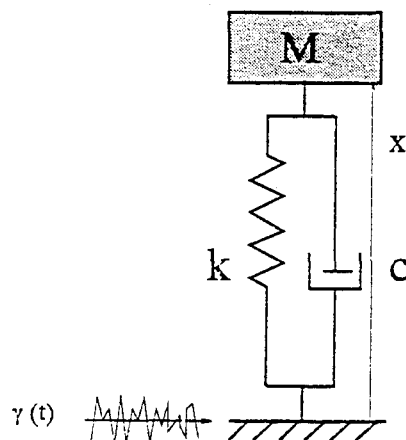
III. SPECTRES INELASTIQUES

A. Rappels sur les spectres élastiques

Une structure soumise à un séisme, reçoit de celui-ci par l'intermédiaire du sol et de ses fondations, une rafale serrée d'accélérations alternées de composantes horizontales et verticales, d'intensité très variable dans le temps. On ne gardera que l'action horizontale du séisme qui est en général largement prédominante.

Toute structure présentant une certaine souplesse admet une amplification des déplacements par rapport à ceux du sol.

La notion de spectre de réponse a pour objet de donner directement la réponse maximale en déplacement, vitesse ou accélération qu'un séisme donné engendre sur une structure donnée, celle-ci étant considérée à un degré de liberté en déplacement. Considérons un oscillateur caractérisé par une masse M , une rigidité transversale K et un coefficient d'amortissement C . Cet oscillateur est sollicité au cours du temps par le déplacement $x_g(t)$ du sol.



Oscillateur élastique 1ddl

Le déplacement absolu (ou total) de la masse M est donné par :

$$(1) \quad x_t(t) = x_g(t) + x(t) \quad \text{avec } x(t) \text{ le déplacement relatif de la masse par rapport au pied de l'oscillateur.}$$

Le déplacement $x(t)$ est régi par l'équation de la dynamique :

$$(2) \quad M\ddot{x}_t(t) + C\dot{x}_t(t) + Kx_t(t) = 0$$

D'après (1) on a :

$$(3) \quad \ddot{x}(t) + 2\xi\omega\dot{x}(t) + \omega^2x(t) = -\ddot{x}_g(t) = -\gamma_{sol}(t) \quad \text{où } \omega \text{ est la pulsation propre du système non amorti et } \xi \text{ le pourcentage d'amortissement critique.}$$

$$(4) \quad \omega^2 = \frac{K}{M} \quad \xi = \frac{C}{2M\omega}$$

La solution de l'équation (3) (pour les conditions initiales $x(0) = \dot{x}(0) = 0$) est donnée par l'expression intégrale de **Duhamel** :

$$(5) \quad x(t) = \frac{-1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad \text{où } \omega_D = \sqrt{1-\xi^2} \text{ est la pulsation}$$

propre du système amorti. Etant donné les valeurs de ξ souvent inférieures à 10%, on est en droit de considérer que la pulsation ω_D reste égale à ω ; La solution (5) peut s'écrire :

$$(6) \quad x(t) \cong -\frac{1}{\omega} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau$$

Le spectre de réponse est une représentation graphique du déplacement maximal d'un oscillateur simple lorsqu'il est soumis à un accélérogramme de séisme donné, en fonction de la pulsation propre ω de l'oscillateur, ou ce qui revient au même, en fonction de sa période propre T ou encore de sa fréquence propre f . ($f = 1/T = \omega/(2\pi)$). En utilisant la solution (6), la valeur maximale du déplacement relatif $x(t)$ est égale à :

$$(7) \quad |x_{\max}| = \frac{1}{\omega} S_v(\xi, \omega)$$

en posant :

$$(8) \quad S_v(\xi, \omega) = \left| \max_t \left[\int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau \right] \right|$$

On désigne par S_v le terme de 'pseudo-vitesse spectrale' (de dimension LT^{-1}) ; on constate que S_v est une fonction de ω , de ξ et de $\ddot{x}(t)$. Pour un accélérogramme donné et pour différentes valeurs de ξ d'amortissement, on peut représenter les courbes de variation de S_v en

fonction de ω (ou de T ou de f) qui sont les spectres de réponse (en pseudo-vitesses) pour le séisme considéré.

Pour chaque valeur de ω , il est immédiat de calculer la valeur maximale du déplacement x que l'on notera S_d , puisque :

$$(9) \quad S_d(\xi, \omega) = \frac{1}{\omega} S_v(\xi, \omega)$$

S_d est appelé le déplacement spectral (de dimension L).

On définit de même la 'pseudo-accélération spectrale' $S_a(\xi, \omega)$ (de dimension LT^{-2}) qui sera reliée à S_d par les relations suivantes :

$$(10) \quad S_a(\xi, \omega) = \omega S_v(\xi, \omega) = \omega^2 S_d(\xi, \omega)$$

B. Rôle de la ductilité

Pour certaines structures, comme les bâtiments ou les tuyauteries, on peut admettre des excursions dans le domaine plastique. Cette prise en compte permet de mieux appréhender le comportement réel des structures.

Il est d'ailleurs reconnu que la propriété de ductilité d'une structure constitue un facteur favorable à la tenue de celle-ci aux actions sismiques. Cependant, la réglementation en vigueur n'admet pas la ductilité de manière explicite dans les règles de dimensionnement sismique nucléaire. De ce fait, et surtout en construction métallique, on a affaire à des surdimensionnements qui pourraient être évités. A titre d'exemple, des essais dynamiques sur des tuyauteries, menés aux U.S.A et en R.F.A, ont permis d'appliquer, sans dommage aux lignes, des niveaux d'excitation atteignant 3 à 4 fois les niveaux théoriques de ruine plastique donnés par les codes. Plus récemment, aux U.S.A des essais ont été menés sur des éléments de tuyauterie jusqu'à des niveaux très élevés, 15 à 20 fois celui de la "ruine" d'après les codes, sous des excitations sismiques ou sinus. En répétant 4 à 5 fois les expérimentations au niveau le plus élevé, on a pu obtenir "ruine" des tuyauteries, mais pas par instabilité plastique, par un autre effet (effet de fatigue Rochet : gonflement de la tuyauterie aboutissant à une fissure transverse).

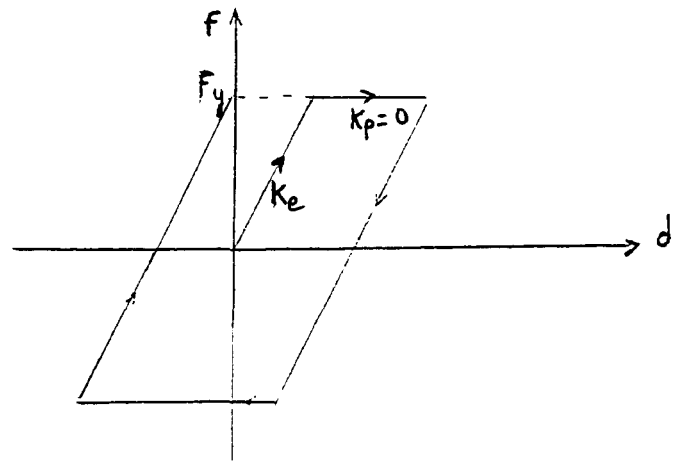
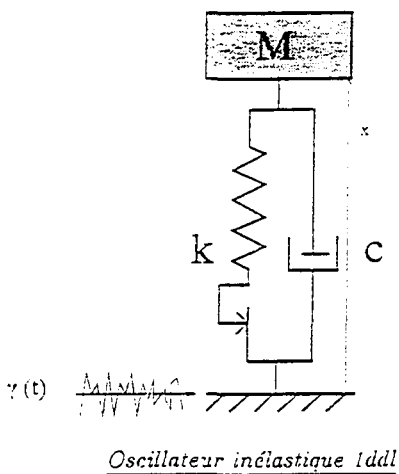
Donc, la possibilité d'avoir des déformations plastiques importantes dans certaines structures ductiles, constitue un facteur que l'on doit prendre en compte pour une meilleure définition de la résistance sismique d'une structure.

C. Modèles non linéaires utilisés (1 D)

Pour aborder la notion de spectre inélastique, il nous faut choisir des modèles non linéaires caractérisant au mieux le comportement des structures. Pour cela, nous avons retenu quatre modèles différents.

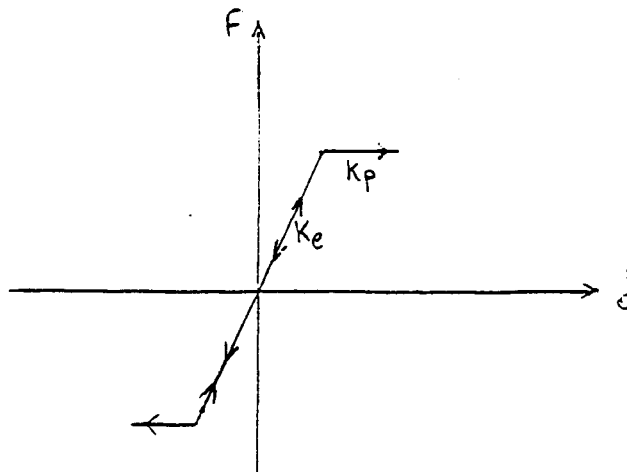
1. modèle élasto-plastique parfait

Caractérisé par une raideur élastique K_e , une raideur plastique $K_p = 0$, un amortisseur visqueux C et une masse M .



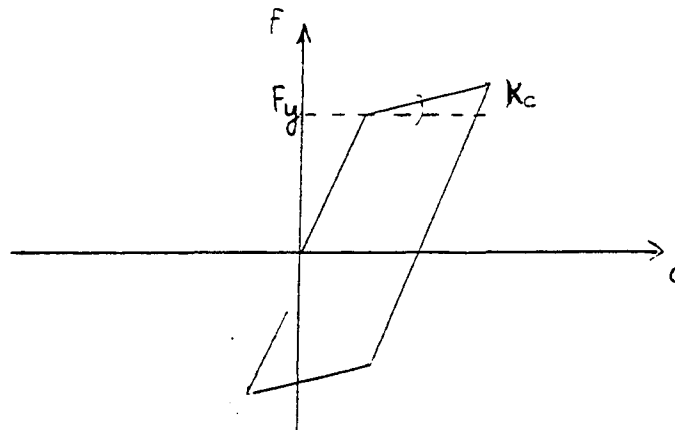
2. modèle élastique non linéaire

Caractérisé par une raideur élastique K_e , une raideur non linéaire $K_p \neq 0$, un amortisseur visqueux C et une masse M .



3. modèle élasto-plastique avec écrouissage cinématique

Caractérisé par une raideur élastique K_e , une valeur d'écrouissage cinématique X_c , un amortisseur visqueux C et une masse M .

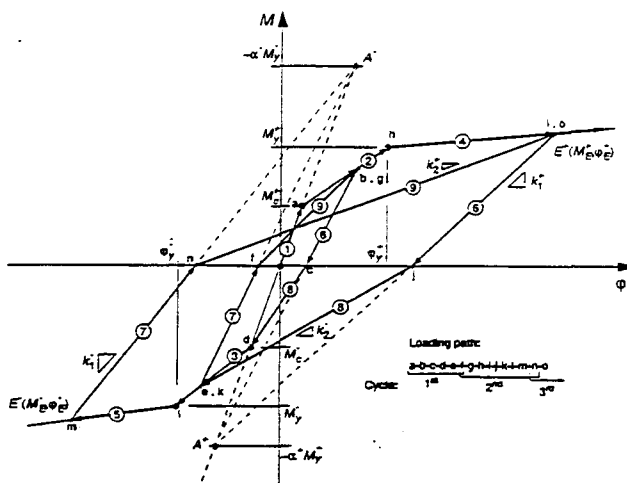


4. modèle de Takéda

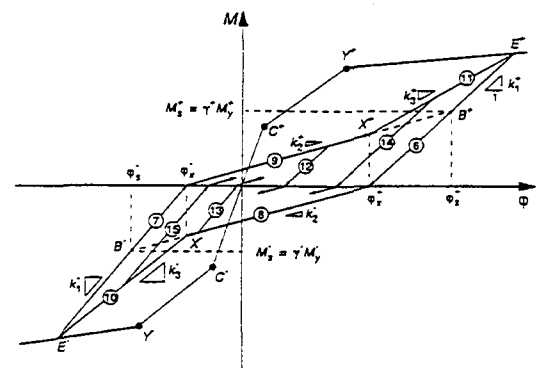
C'est une loi tri-linéaire correspondant à la fissuration, la plastification (des aciers) et à la ruine. Le modèle retenu est un modèle simplifié de Takéda défini à partir des trois paramètres α, β, γ . Ces paramètres représentent la diminution de raideur, le phénomène de pincement (pinching), et la diminution de résistance. Les courbes suivantes expliquent, sur des évolutions moment-courbure, la signification de ces paramètres.

a) paramètre α . diminution de la raideur :

b) paramètre β . pincement ou pinching :

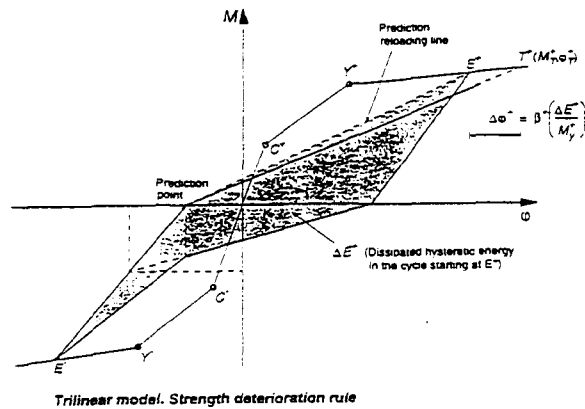


Hysteretic rules of the trilinear model. General loading path

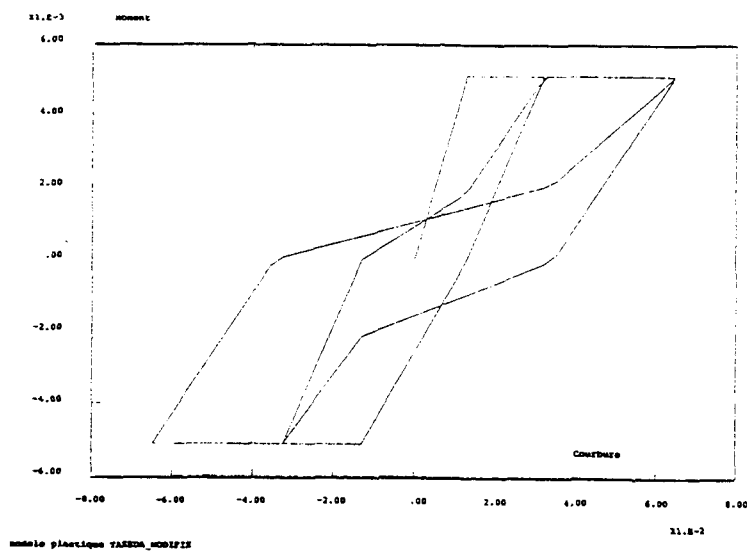


Trilinear model. The pinching effect and interior cycles

c) paramètre γ . diminution de la résistance :



Le modèle retenu, pour $\alpha = 2$; $\beta = 0.5$ et $\gamma = 0$ est représenté sur une courbe moment-courbure :



D. Notion de spectre inélastique

Dans un premier temps, nous présenterons le cas simple d'une accélération de type impulsion de Dirac, imposée à la base d'un oscillateur simple. Cet exemple permettra d'introduire la notion de spectre inélastique. On généralisera ensuite l'approche au cas d'une excitation sismique puis nous présenterons les spectres inélastiques d'accélérogrammes.

Nous considérons un oscillateur simple sans amortissement visqueux, le comportement sera élastique puis élasto-plastique. L'équation du mouvement relatif par rapport à la base s'écrit en régime élastique :

$$(11) \quad \ddot{x}(t) + \omega^2 x(t) = -\gamma_0(t)$$

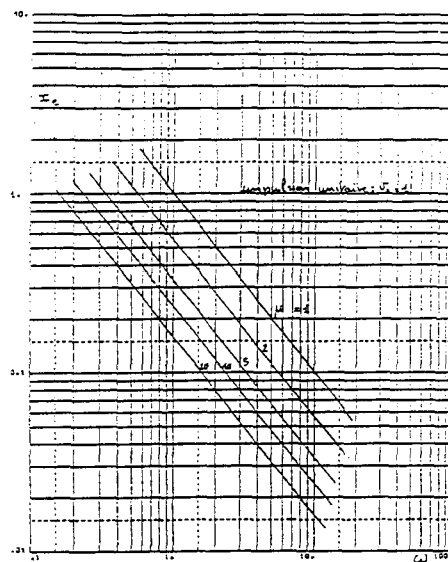
- $\gamma_0(t)$ est une impulsion, ce que nous écrivons :

$$\gamma_0(t) = -v_0 \delta(t), \quad \delta(t) : \text{impulsion de Dirac.}$$

La réponse élastique est bien connue et s'écrit, pour des conditions initiales nulles :

$$(12) \quad x_0(t) = \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t$$

Nous désignons par X_0 le maximum de $|x_0(t)|$. On a dans le cas présent $X_0 = v_0/\omega$. On a tracé sur la figure suivante $X_0(\omega)$ qui est donc le spectre de réponse élastique de $\gamma_0(t)$ pour un amortissement nul (le tracé est fait avec $v_0 = 0$).



Spectre inélastique d'une impulsion

Nous considérons maintenant un comportement élasto-plastique parfait, défini par le modèle 1 précédemment. x_e est la limite d'élasticité en déplacement et x_u la limite ultime

correspondant à la ruine. On désigne par $x_p(t)$ la réponse en régime plastique à l'impulsion $\gamma_0(t)$ et par X_p son maximum.

On suppose bien entendu qu'on est dans le cas non trivial où $X_0 > x_e$.

Le calcul de $x_p(t)$ est fait en ignorant la limite x_u ; le chargement sera admissible si $X_p < x_u$.

1. Ductilité admise, ductilité appelée

La ductilité admise est μ_u définie par :

$$(13) \quad \mu_u = \frac{x_u}{x_e}$$

la ductilité appelée est μ_a définie par :

$$(14) \quad \mu_a = \frac{X_p}{x_e}$$

Dans le cas d'une impulsion, le calcul de μ_a est immédiat, il suffit d'écrire que l'énergie cinétique injectée à l'instant initial par l'impulsion est égale à l'énergie de déformation au moment où celle-ci est maximale :

$$(15) \quad \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}kx_e^2 + kx_e(X_p - x_e) \quad \text{on fait apparaître une équation en déplacement en}$$

substituant $\frac{1}{2}kX_0^2$ à $\frac{1}{2}mv_0^2$:

$$(16) \quad \frac{1}{2}X_0^2 = -\frac{1}{2}x_e^2 + x_eX_p \quad \text{d'où :}$$

$$(17) \quad \left(\frac{X_0}{x_e}\right)^2 = 2\mu - 1 \quad \text{soit :}$$

$$(18) \quad \mu_a = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{X_0}{x_e}\right)^2 + 1 \right]$$

On peut également observer qu'un oscillateur élastique, parfaitement plastique (ω, X_e, μ_u) est juste admissible pour le chargement $\gamma_0(t)$ si sa limite élastique vaut au moins :

$$x_e = \frac{1}{\sqrt{2\mu_u - 1}} X_0$$

Dans le cas de l'oscillateur élastique fragile ($\mu_u = 1$), on trouve évidemment que x_e doit au moins être égal à X_0 .

2. Accélération quelconque

Il est bien entendu possible de renouveler l'opération précédente en choisissant un autre $\gamma_0(t)$. Il s'agit maintenant d'un mouvement sismique. On obtient de la même façon X_0 , maximum de la réponse élastique de l'oscillateur de pulsation ω ; $X_0(\omega)$ est le spectre de réponse élastique. En introduisant la limite d'élasticité x_e , on calcule la ductilité appelée μ_a .

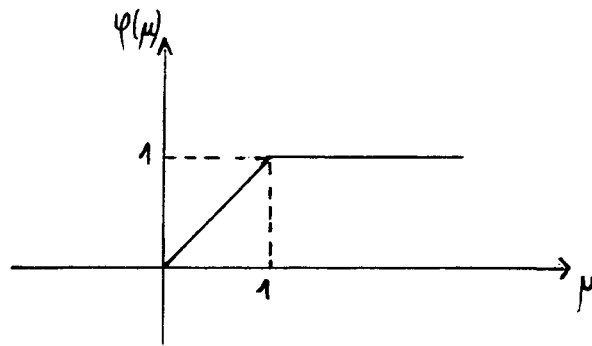
Il existe donc, pour un $\gamma_0(t)$ donné, pour une relation entre ω , X_0 , x_e , et μ_a , qui dans le cas général ne peut être obtenue que numériquement. Il est cependant toujours possible avec les lois de comportement du type choisi, d'écrire cette relation sous la forme :

$$(19) \quad f\left(\omega, \frac{X_0}{x_e}, \mu_p\right) = 0$$

En effet, l'équation du mouvement relatif d'un oscillateur non amorti dont le ressort a le comportement élasto-plastique parfait s'écrit :

$$(20) \quad m\ddot{x} + F(x) = -m\gamma_0(t) \quad \text{avec } F(x) = kx \text{ pour } x < x_e \text{ et } F(x) = F_e \text{ pour } x > x_e.$$

$$(21) \quad \frac{\ddot{x}}{x_e} + \frac{F_e}{mx_e} \varphi\left(\frac{x}{x_e}\right) = -\frac{\gamma_0}{x_e} \quad \text{où } \varphi \text{ est la fonction de graphe suivant :}$$



Il vient en posant $\mu(t) = x(t) / x_e$:

$$(22) \quad \ddot{\mu} + \omega^2 \varphi(\mu) = -\gamma_0 / x_e$$

La ductilité appelée est donc fonction de ω et du rapport γ_0/x_e (c'est à dire du rapport X_0/x_e).

Le raisonnement s'étend sans difficulté à tout comportement de type élasto-plastique.

Les oscillateurs (ω, x_e, μ_u) juste admissibles pour $\gamma_0(t)$ sont alors tels que :

$$(23) \quad f\left(\omega, \frac{X_0}{x_e}, \mu_u\right) = 0 \quad \text{Il est clair que par définition } f(\omega, 1, 1) = 0 \text{ pour tout } \omega.$$

On peut observer que si l'oscillateur (ω, x_e, μ_u) est juste admissible pour $\gamma_0(t)$, alors $(\omega, \lambda x_e, \mu_u)$ est juste admissible pour $\lambda \gamma_0(t)$: le spectre inélastique de $\lambda \gamma_0(t)$ se déduit de celui de $\gamma_0(t)$ par la même translation en échelle logarithmique que le spectre élastique.

On peut étudier le caractère admissible d'un accélérogramme de spectre $X_0(\omega)$ en lui associant une fonction $X_e(\omega)$ définie par:

$$(24) \quad f\left(\omega, \frac{X_0(\omega)}{X_e(\omega)}, \mu_u\right) = 0$$

On montre alors pour un oscillateur (ω, x_e, μ_u) donné, l'équivalence :

$$(25) \quad X_e(\omega) < x_e \Leftrightarrow \mu_a < \mu_u$$

Il faut toutefois faire ici une conjecture : la pulsation ω étant fixée, considérons l'expression explicite de μ_a en fonction de X_0/x_e que nous écrivons:

$\mu_a = g_\omega(X_0/x_e)$ conjecture : g_ω est croissante. Il semble raisonnable de penser que la ductilité appelée est une fonction croissante du niveau d'excitation.

Dans ces conditions, il suffit d'observer que par définition :

$$(26) \quad \mu_u = g_\omega\left(\frac{X_0(\omega)}{X_e(\omega)}\right) \text{ pour aboutir à (25).}$$

Il est important de noter que contrairement au cas de l'impulsion, le passage de $X_0(\omega)$ à $X_e(\omega)$ ne se fait plus à l'aide d'une formule indépendante de ω : $X_e(\omega)$ ne peut plus s'interpréter comme le spectre de réponse d'un accélérogramme $\gamma_e(t)$ qui serait déduit de $\gamma_0(t)$ par une constante multiplicative.

Nous avons en annexe I des exemples de spectres inélastiques en pseudo-accélération paramétrés en μ , pour différents modèles.

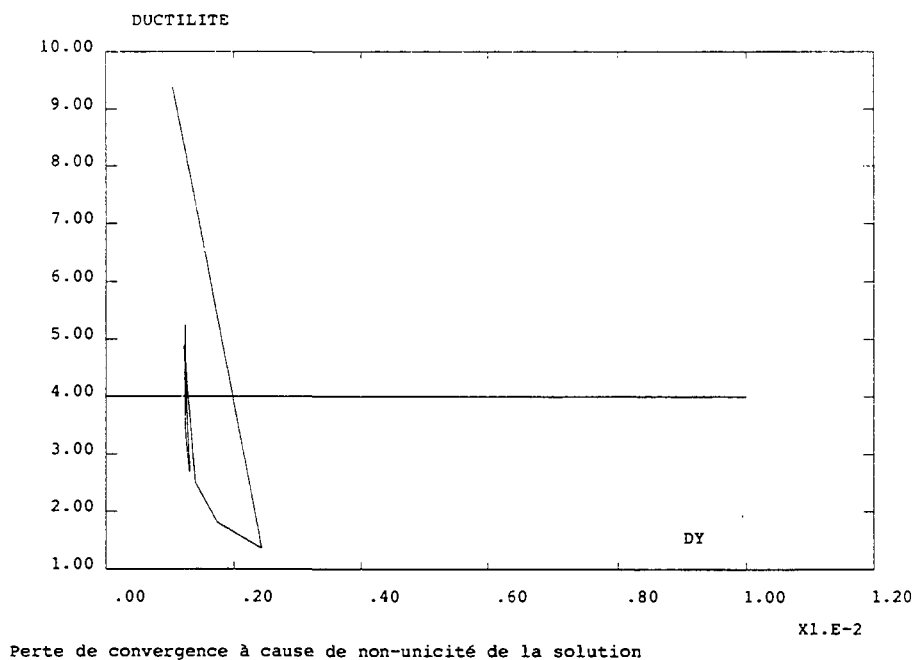
3. Remarques sur l'utilisation des spectres inélastiques

Le principe de l'utilisation du spectre inélastique est le suivant :

- On se donne une ductilité admise pour la structure μ_u .
- On considère le spectre de réponse élastique de dimensionnement $X_0(\omega)$ à appliquer sur la structure ; et on en déduit le spectre inélastique correspondant : $X_e(\omega)$.
- On calcule les efforts dans la structure sous l'effet de $X_e(\omega)$. Si les contraintes ainsi obtenues sont élastiquement admissibles, la structure est acceptable. En effet, les déformations engendrées au cours d'un séisme correspondant à $X_0(\omega)$ resteraient en principe inférieures à la déformation ultime admise.

Il est souvent énoncé que pour calculer le déplacement (ou la déformation) dans un système de ductilité μ , il suffit de faire un calcul élastique avec le spectre inélastique correspondant à μ , puis de multiplier le résultat obtenu par μ . Cet énoncé est imprécis car il ne fait pas de distinction entre ductilité appelée et ductilité admise, il ne devient exact que pour un oscillateur juste dimensionné, c'est à dire tel que la ductilité appelée est égale à la ductilité admise.

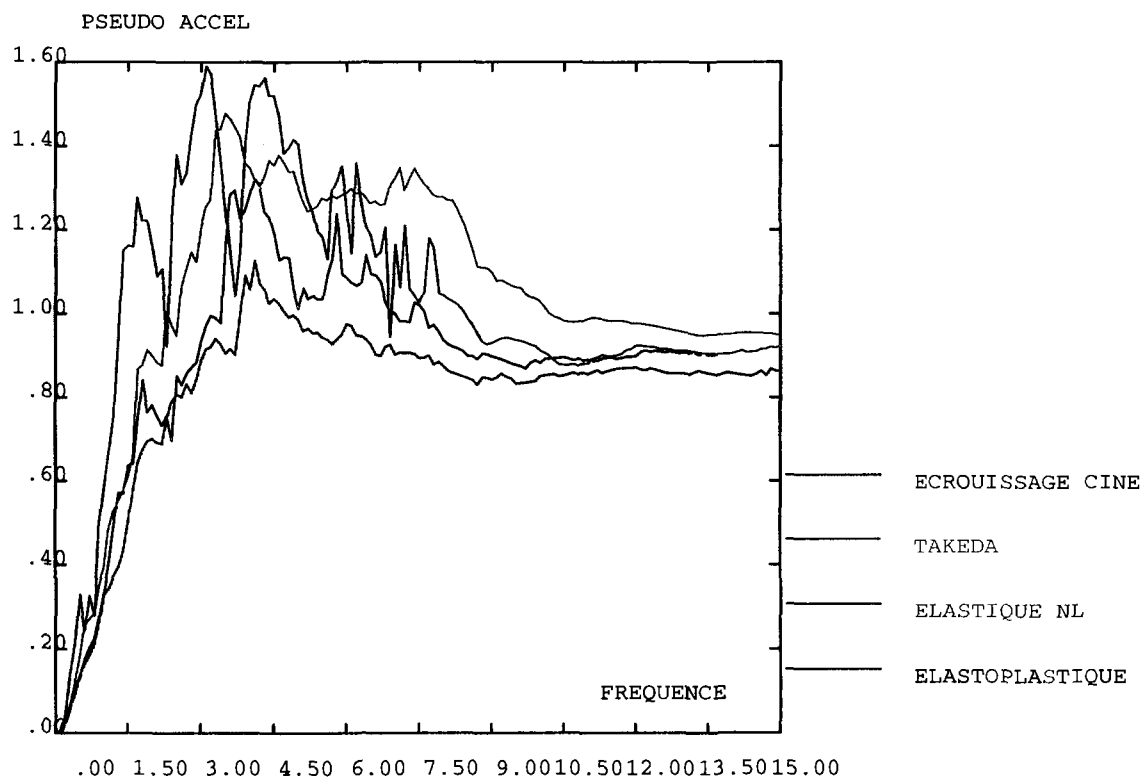
Enfin, il faut préciser que lors du calcul de spectres inélastiques, nous avons rencontré ponctuellement des problèmes de convergence. En effet, pour certains déplacements élastiques, on peut avoir plusieurs ductilités appelées μ_a qui sont solutions. Ceci est dû à la non linéarité des modèles étudiés et donc à la non unicité de la solution. La courbe ci-après traduit cette non unicité de la solution :



E. Calculs effectués

1. Comparaison entre les différents modèles

Le schéma suivant montre les différences entre les modèles explicités précédemment sur un spectre non linéaire. Les modèles ont tous une ductilité de 4 et un amortissement de 2%. Nous avons pris un écrouissage cinématique $K_c=0.1$, et des valeurs pour le modèle de Takeda: $\alpha=2$, $\beta=0.5$, $\gamma=0$.



ELCENTRO NORD-SUD EN (M/S²)

On voit par exemple que le modèle élastique non linéaire, par rapport au modèle élasto-plastique parfait a des valeurs de pseudo-accélération supérieures. Ceci étant dû au non amortissement du modèle. On remarque également que le modèle de Takéda a des réponses assez élevées car le paramètre γ (diminution de la résistance) impose des dissipations énergétiques moins importantes que pour le modèle élasto-plastique parfait.

2. Importance et rôle de la ductilité

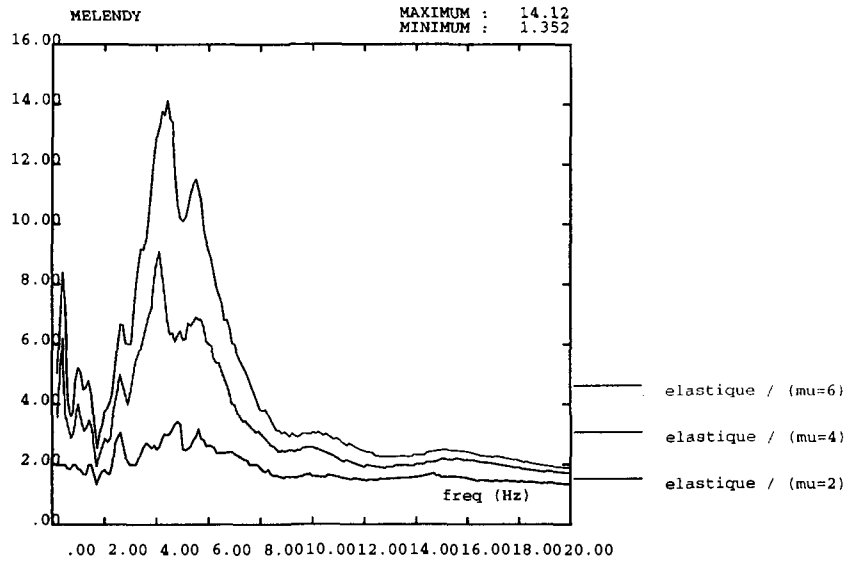
Après avoir comparé les modèles, nous avons voulu voir pour un des modèles, l'importance de la ductilité pour chaque séisme. Pour ce faire, nous avons calculé les spectres élastiques et inélastiques (pour trois ductilités différentes, $\mu=2,4,6$ et $\xi=5\%$) à l'aide de l'opérateur SPON de CASTEM qui a été modifié pour l'étude. Puis, on a effectué le rapport des spectres élastiques sur les spectres inélastiques pour voir si la ductilité atténuait les réponses de manière équivalente pour les deux sortes de séisme. Les schémas suivants traduisent ces rapports pour le modèle élasto-plastique avec écrouissage cinématique (tous les modèles se comportent de la même manière) et pour trois séismes, deux proches, Melendy et San Francisco, et un lointain, Taft.

Les schémas sont présentés sur la page suivante. On remarque que les séismes proches ont des valeurs de rapport supérieures à celles du séisme lointain, comme l'indiquent les valeurs maximales en haut de chaque schéma. Pour Taft et San Francisco on obtient des résultats presque identiques mais, la valeur maximale de Taft est atteinte en 0 ce qui pourrait être une singularité numérique. En effet, si on ne tient pas compte de cette valeur, l'autre maximum est aux alentours de 10.

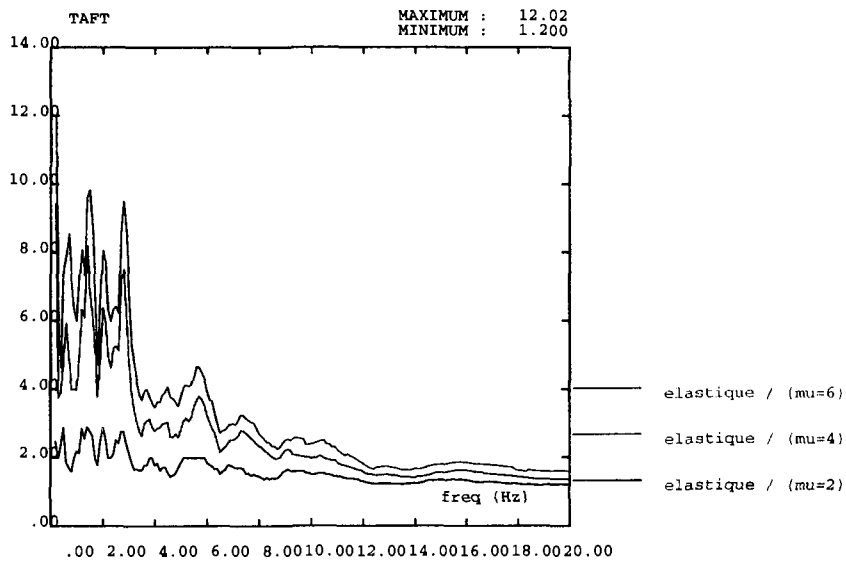
Ces rapports nous montrent que la ductilité joue un rôle plus important pour les séismes proches car, pour une même ductilité, on a besoin d'une limite élastique plus faible que pour un séisme lointain. De ce fait, le rapport du spectre élastique sur le spectre inélastique est plus important pour les séismes proches. Cet exemple montre qu'en tenant compte de la ductilité, le séisme proche n'est plus aussi nocif que le laissait supposer le spectre élastique.

3. Gain par rapport au spectre élastique

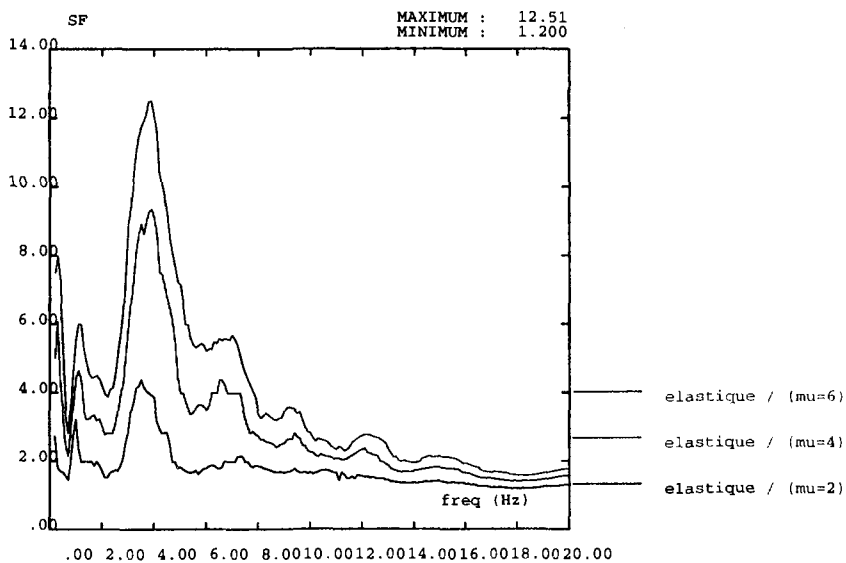
Nous avons ensuite calculé les spectres inélastiques en déplacement et en pseudo-accelération pour chaque séisme et chaque modèle. Ces calculs ont été effectués pour trois ductilités différentes, $\mu=2,4,6$ et pour la même valeur d'amortissement $\xi=5\%$. Le paramètre est la ductilité (et le modèle) car sur chaque schéma apparaissent tous les séismes (voir annexe 1). Puis, après avoir calculé les courbes enveloppes maximales pour les séismes proches et minimales pour les séismes lointains, et cela pour toutes les ductilités, nous avons calculé le



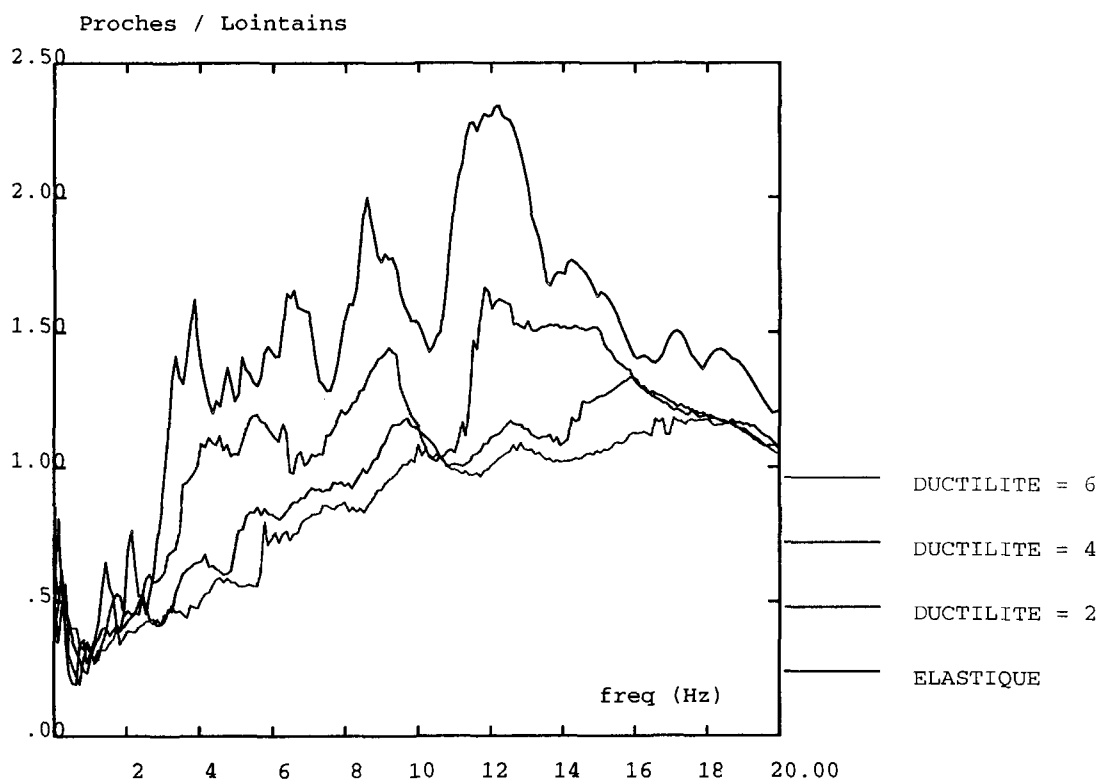
rapport des spectres elastiques sur inelastiques



rapport des spectres elastiques sur inelastiques



rapport des séismes proches sur les séismes lointains pour les spectres élastiques et inélastiques

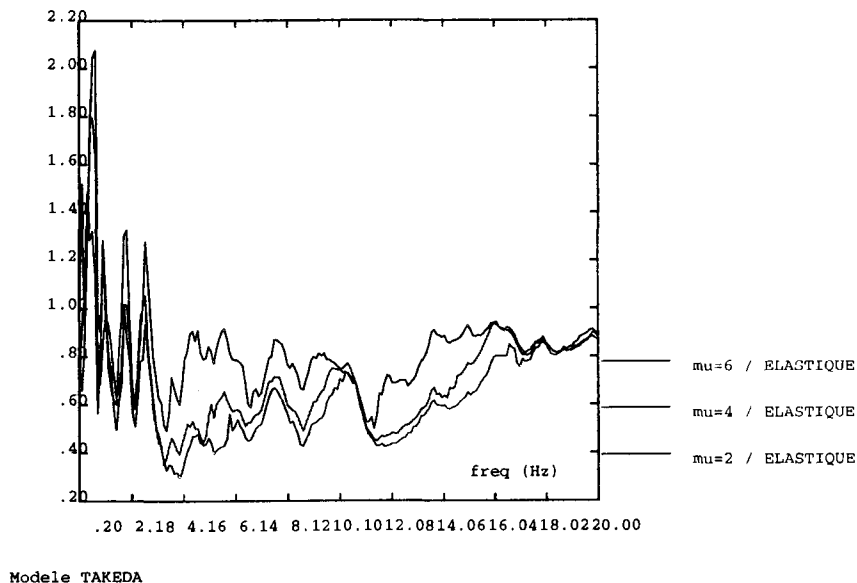


Modele de TAKEDA

Les autres modèles se comportent de la même manière.

Ces courbes traduisent la différence de dimensionnement entre séismes proches et lointains. On remarque que l'on a besoin d'une limite élastique supérieure pour les séismes proches que pour les séismes lointains. Cependant, cet écart tend à diminuer avec la ductilité. A titre d'exemple, cette courbe montre que pour un oscillateur de fréquence propre égale 12 Hz on a une réponse élastique 2.4 fois supérieure pour les séismes proches que pour les lointains. Alors que pour une ductilité $\mu=6$ on a, toujours pour 12 Hz, la même limite élastique. Sachant que les courbes enveloppes utilisées pour effectuer les rapports correspondent aux réponses maximales pour les séismes proches et aux réponses minimales pour les séismes lointains, on montre de manière évidente que le dimensionnement à l'aide du spectre élastique est trop pénalisant. Cet exemple montre que dans le pire des cas, on a un gain de 2.4 au niveau des contraintes de dimensionnement, pour une ductilité de 6 dans la structure.

Pour illustrer l'exemple traité précédemment nous avons effectué un autre calcul. Nous avons fait le rapport des courbes inélastiques précédentes sur la courbe élastique précédente.



On remarque que ce rapport, pour des fréquences supérieures à 2Hz est toujours inférieur à 1. Ce qui prouve que la ductilité atténue plus la réponse de l'oscillateur quand celui-ci est soumis à un séisme proche.

4. Essai sur deux oscillateurs en série

La méthode vu précédemment est évidemment convenable pour une structure monomodale. Le but est d'essayer d'adapter la notion de spectre inélastique à des structures multimodales et de voir le comportement d'un double oscillateur soumis à un séisme.

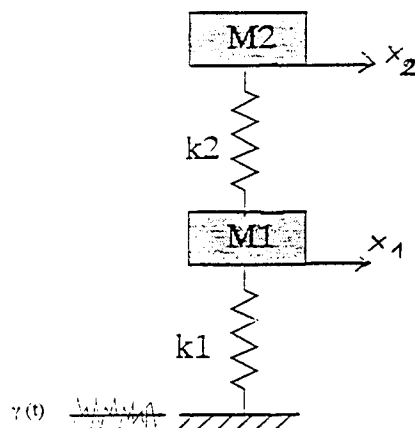
Cette dernière partie sur les spectres inélastiques comprend deux étapes. Premièrement, nous avons dimensionné un double oscillateur (en série) pour un séisme lointain. C'est à dire que l'on calcule les contraintes que le séisme va provoquer dans la structure pour pouvoir ensuite déterminer la limite élastique de notre structure (dans notre cas la structure est l'oscillateur double). La limite élastique calculée correspond à la contrainte maximale engendrée. Nous avons pris comme limite élastique pour notre oscillateur, la moitié de celle calculée pour le dimensionnement, de manière à « avoir » une ductilité de 2. Ensuite,

nous soumettons notre structure à un séisme proche et lointain et nous regardons les ductilités appelées à chaque étage.

a) Dimensionnement

Nous avons pour notre double oscillateur, une raideur $K1$ et une masse $M1$ pour le premier étage et une raideur $K2 = K1/2$ et une masse $M2 = M1/2$ pour le deuxième étage. Ces raideurs et masses sont calculées de manière à obtenir une fréquence propre de l'ordre de 5.5 Hz, fréquence principale des séismes proches soit, la fréquence où la réponse en pseudo-accélération est maximale. De plus, nous prenons comme spectre de dimensionnement, la courbe enveloppe minimale des réponses élastiques aux séismes lointains. L'ensemble des paramètres ainsi choisis forme un cas très défavorable pour les séismes proches.

Notre double oscillateur est défini comme suit:



Le système est solidaire du sol qui lui impose son accélération $\gamma(t)$. Dans le système relatif au mouvement du sol, l'équation du mouvement s'écrit:

$$(27) \quad M\ddot{x} + A\dot{x} + Kx = -MU\gamma(t) \quad \text{avec } x(0) = 0 \text{ et } U \text{ le vecteur déplacement unité en tout point du système dans la direction de séisme considéré.}$$

Soient $X_n(r)$ les solutions du système conservatif associé :

$$(28) \quad (K - \omega_n^2 M)X_n = 0 \quad \text{avec } X_n(0) = 0.$$

On utilise les X_n comme base de projection du champ des déplacements relatifs x :

$$(29) \quad x(r, t) = \sum_n a_n(t)X_n(r)$$

En admettant l'hypothèse de Basile, c'est à dire que la matrice d'amortissement est diagonalisable dans le système de X_n , on obtient un système découplé sur les nouveaux degrés de liberté a_n :

$$(30) \quad \ddot{a}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{a}_n = -\frac{q_n}{m_n} \gamma(t) \quad (\forall n) \quad \text{avec:}$$

m_n = masse généralisée

ω_n = pulsation de résonance

ξ_n = amortissement réduit

$q_n = (X_n, MU)$ = facteur de participation

La donnée du séisme étant le SRO, en pseudo-accelération $S_a(\omega, \xi)$ par exemple, on obtient de suite le maximum atteint par $|a_n(t)|$ lors de l'excitation sismique :

$$(31) \quad (a_n)_{\max} = \frac{|q_n|}{m_n \omega_n^2} S_a(\omega_n, \xi_n)$$

Pour le premier étage, nous avons $F_1 = K_1 \cdot x_1$ ($= \sigma_1$ car nous sommes en 1D). Pour le deuxième étage, on a $F_2 = K_2 \cdot (x_2 - x_1)$ Donc pour le premier mode on a :

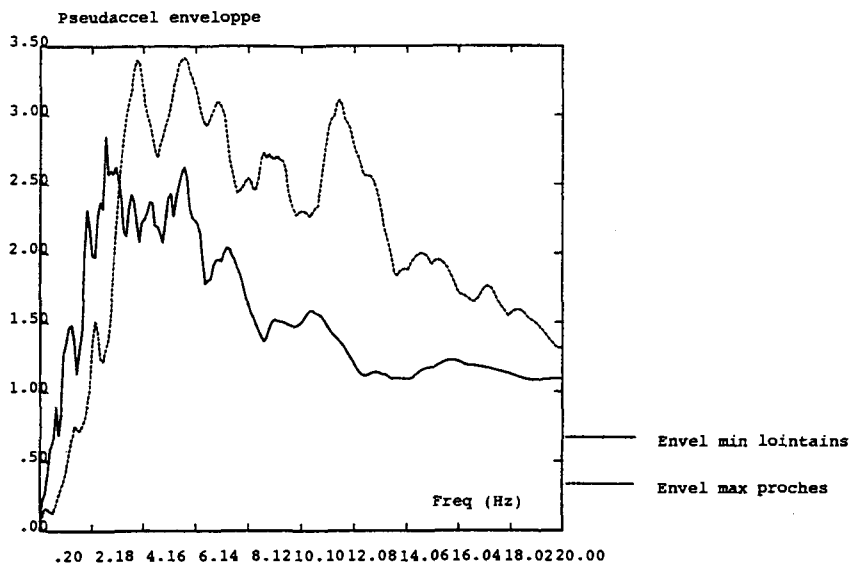
$$(32) \quad F_{11\max} = K_1 \cdot a_{1\max} X_{11} \quad \text{et} \quad F_{12\max} = K_2 \cdot a_{1\max} (X_{12} - X_{11})$$

Le premier indice est le mode, le deuxième l'étage.

Pour le deuxième mode :

$$(33) \quad F_{21\max} = K_1 \cdot a_{2\max} X_{21} \quad \text{et} \quad F_{22\max} = K_2 \cdot a_{2\max} (X_{22} - X_{21})$$

Nous avons obtenu les $a_{n\max}$ grâce à l'équation (19) et aux courbes enveloppes élastiques suivantes :



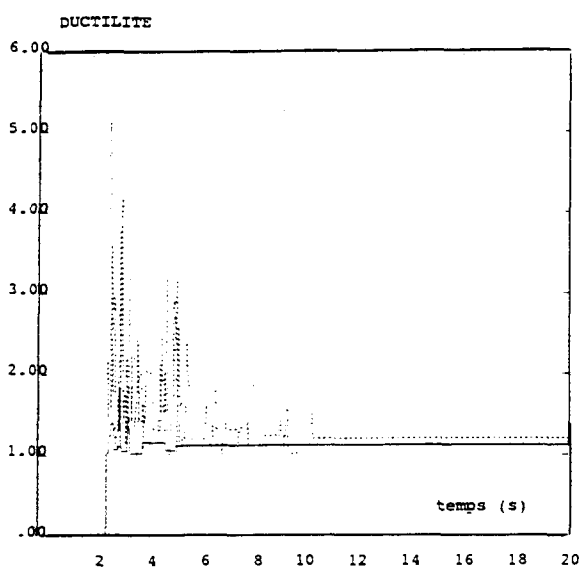
Spectre elastique enveloppe. modele EPP

Ce qui nous donne pour le premier étage et le deuxième étage :

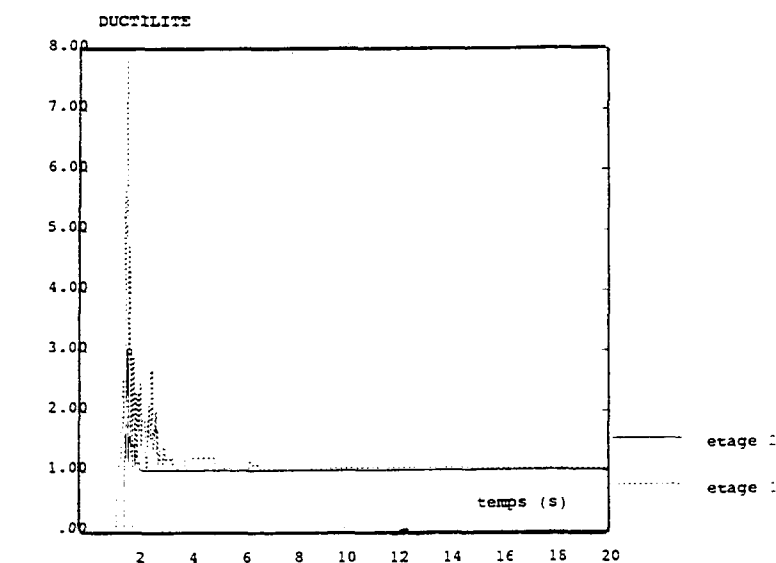
$$(34) \quad F_{1\max} = \sqrt{(F_{11\max}^2 + F_{21\max}^2)} \quad \text{et} \quad F_{2\max} = \sqrt{(F_{21\max}^2 + F_{22\max}^2)}$$

b) Ductilités appelées à chaque étage

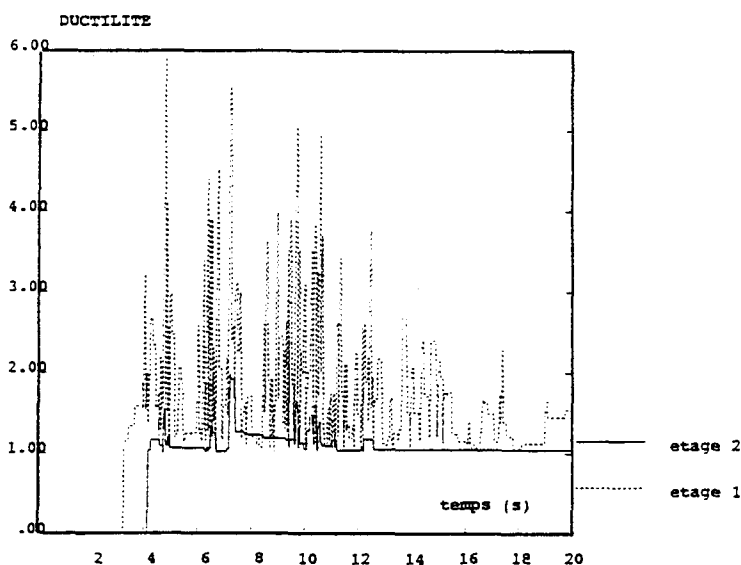
Ensuite, nous rentrons notre loi effort-déplacement avec comme limite élastique pour le premier étage la moitié de $F_{1\max}$ et la moitié de $F_{2\max}$ pour le deuxième étage. Notons que ce dimensionnement a été effectué pour un séisme lointain. Puis nous soumettons notre nouvelle structure à tous les séismes que nous possédons, proches et lointains pour comparer les appels de ductilité.



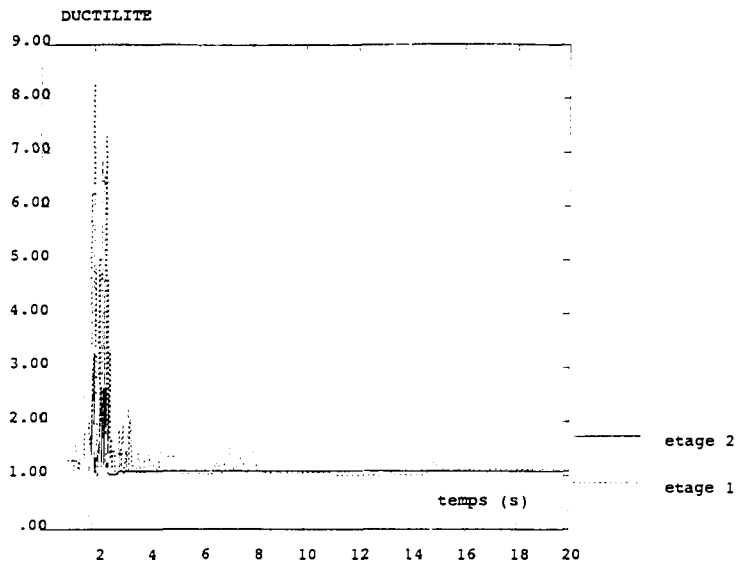
ANCONA



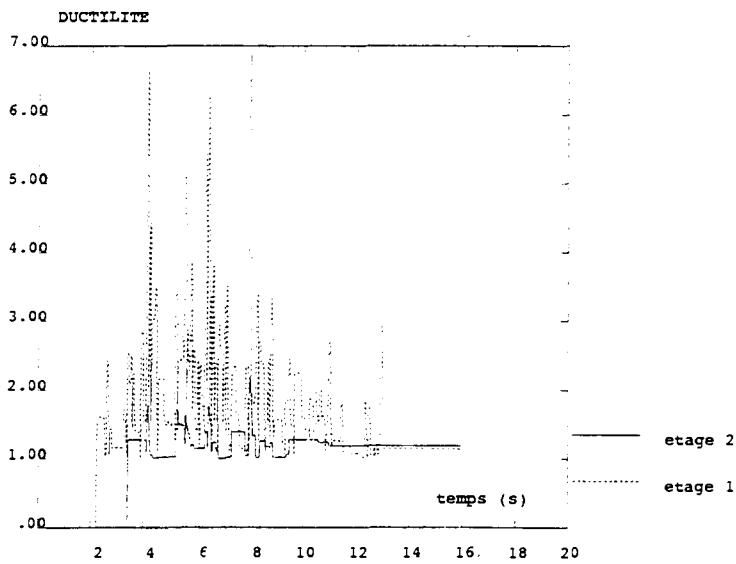
MELENDY



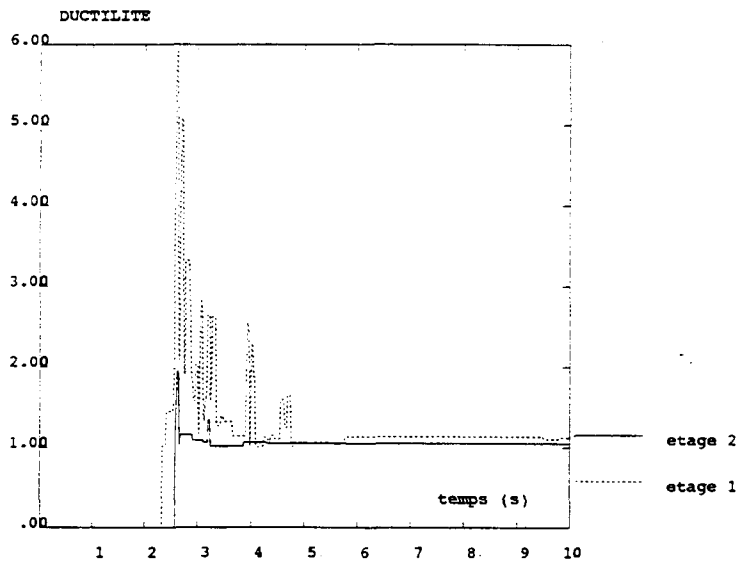
TAFT



SAN FRANCISCO



NICE

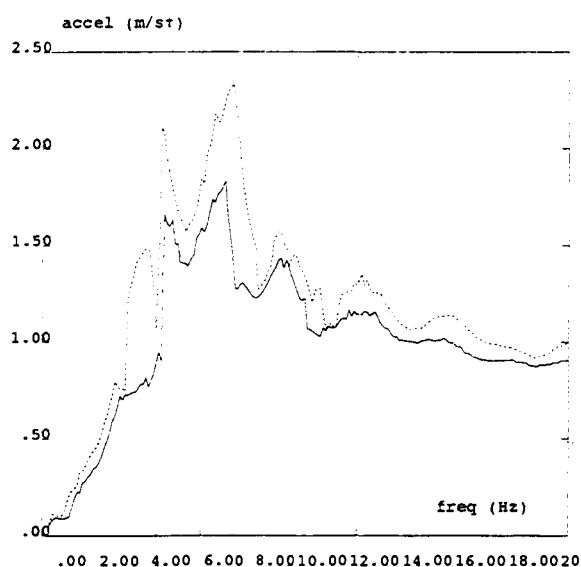


Les ductilités appelées maximales sont pour les séismes proches San Francisco et Melendy, et valent respectivement 8.2 et 7.8. Cependant, pour Taft et Nice, on trouve des ductilités appelées égales à 6 et 7 alors que pour les deux autres séismes proches, on a des ductilités appelées inférieures à 6. Cet exemple montre quand même la limite du spectre inélastique pour des structures multimodales. Cet exemple montre également qu'il est difficile d'établir une moindre nocivité des séismes proches par rapport aux séismes lointains. Il faut cependant préciser que le cas étudié est très défavorable aux séismes proches puisqu'il s'agit d'une structure dimensionnée par la courbe enveloppe minimale des séismes lointains.

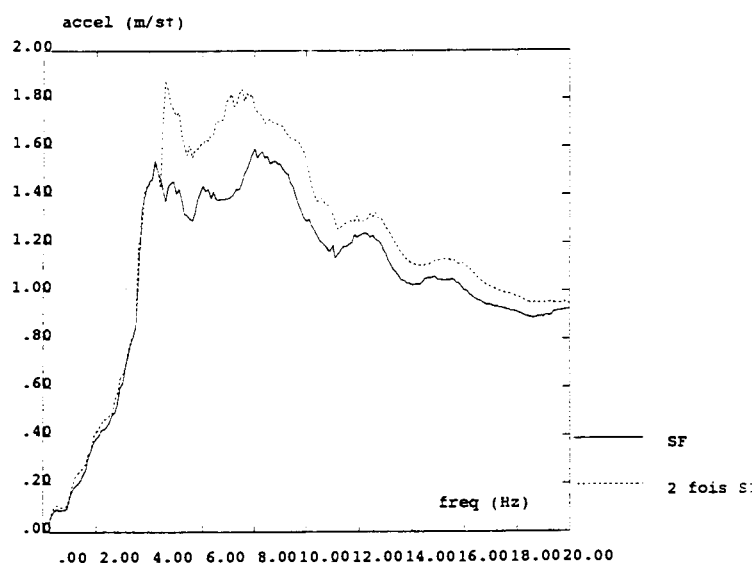
F. Critères de nocivité

1. Durée du séisme

Une des grandes différences entre les séismes proches et lointains est la durée du signal. En effet, la plupart des séismes proches ont une durée inférieure à 10s alors que les séismes lointains dépassent régulièrement les 20 ou 30s. Pour vérifier si ce paramètre est un critère de nocivité, nous avons soumis un oscillateur inélastique de type élasto-plastique parfait et un autre de type Takéda à un séisme composé de deux fois le séisme de San Francisco (l'un à la suite de l'autre). Nous obtenons les spectres en pseudo-accélération suivants :



spectres inelastiques en Pseudo-accél EPP. $e=5\%$, $\mu=2$



spectres inelastiques en Pseudo-accél Takeda. $e=5\%$, $\mu=2$

Les spectres montrent qu'effectivement la durée même du signal est un critère d'agressivité puisque les réponses d'oscillateur, soumis à deux fois San Francisco, sont systématiquement supérieures à celles de l'oscillateur soumis au séisme simple. Ceci tend à montrer que les séismes lointains sont peut-être plus nocifs que les proches, du point de vue de ce critère.

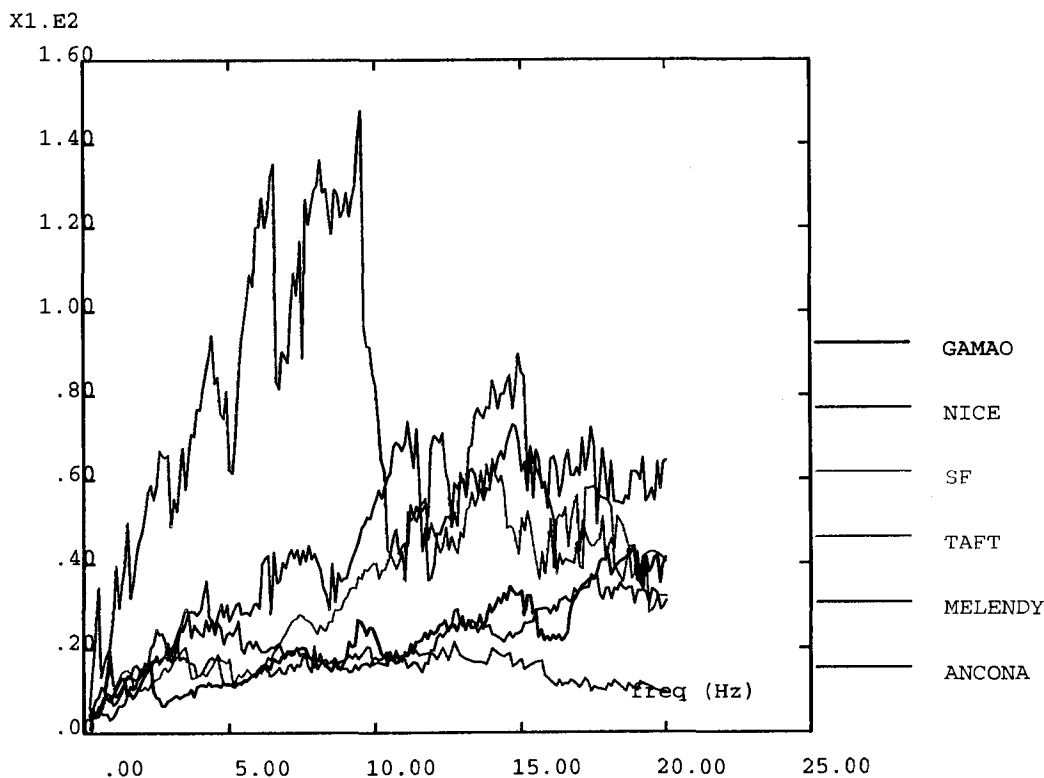
2. Notion de cycles

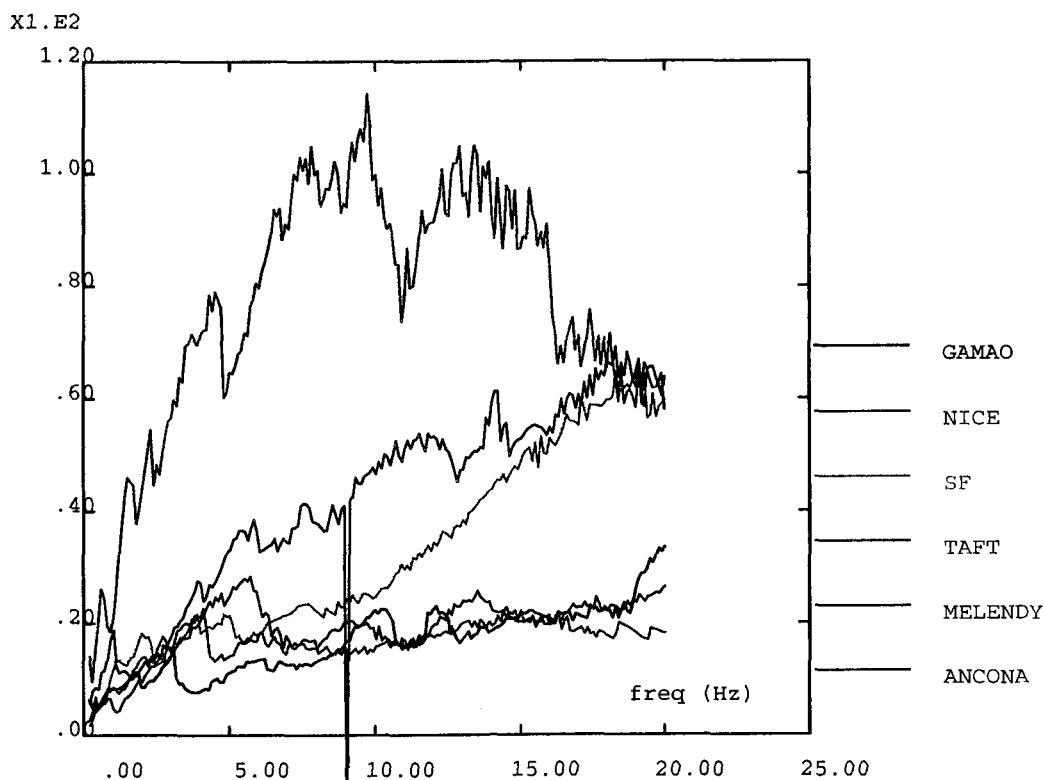
Un autre critère possible de nocivité est le nombre de cycles non linéaires que le séisme impose à l'oscillateur. Pour en avoir une estimation, nous avons calculé pour chaque séisme et chaque ductilité, les déplacements plastiques cumulés en fonction de la pulsation de l'oscillateur. Nous avons donc construit des spectres de réponse en déplacement plastique cumulé, qui nous indiquent, pour une ductilité fixée, le déplacement plastique maximum engendré par le séisme sur la structure. En effectuant le calcul suivant :

$$(35) \quad \text{Nbre de cycles} = \frac{S_{\text{DEPL.PLAS.CUMULE}}}{S_{\text{DEPL}} * (\mu - 1)}$$

on obtient une estimation du nombre de cycles d'amplitude maximum que l'oscillateur aurait subi pour obtenir la déformation plastique cumulée trouvée.

Les courbes suivantes traduisent ce nombre de cycles pour un modèle de Takéda et une ductilité $\mu = 2$. et $\mu = 4$.





Nombre maximum de cycles effectues. e=5%. =4

Premièrement on remarque que Taft, séisme lointain, impose à la structure, un nombre de cycle bien supérieur à celui imposé par les autres séismes. Nice qui est aussi un séisme lointain engendre un nombre de cycle inférieur ou égal aux autres séismes ; cependant, il faut spécifier que Nice est un séisme crée artificiellement et que sa durée est inférieure à 20s. On ne peut donc pas conclure sur ce critère mais remarquer que Taft est le séisme qui occasionne le plus de cycle et également celui qui engendrait des réponses (déplacement ou pseudo-accélération) souvent supérieures aux séismes proches.

IV. CONCLUSION

La prise en compte du caractère inélastique des structures dans le dimensionnement parasismique ne fait pas l'objet des règles édictées par l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire. Cependant on peut admettre pour certaines structures des incursions dans le domaine non linéaire, de manière à mieux appréhender leur comportement réel. Il semble donc justifié de prendre en compte la ductilité lors du dimensionnement. De plus la démarche de dimensionnement actuelle, fondée sur les spectres de réponses d'oscillateur élastiques, montre que les séismes proches sont plus nocifs que les séismes lointains alors que l'expérience tend à prouver l'inverse. Nous avons donc essayé, par l'utilisation des spectres inélastiques, de vérifier cette tendance.

Les spectres inélastiques montrent clairement, pour tout les modèles, que la ductilité influe plus sur la réponse des séismes proches. C'est à dire que la diminution de la limite élastique pour atteindre la même ductilité (c'est à dire la marge), est plus importante pour les séismes proches que pour les séismes lointains. L'extrapolation de ces résultats à des structures à plusieurs degrés de liberté n'est pas évidente car l'étude de l'oscillateur double n'a pas toujours confirmé cette tendance. En effet, deux des séismes proches ont des ductilités appelées supérieures à celles des deux séismes lointains et les deux autres séismes proches des ductilités inférieures. Cependant, il faut tout de même préciser que le dimensionnement du double oscillateur a été effectué pour un séisme lointain, et que la pulsation du premier étage, 5.5 Hz, correspond à la fréquence principale des séismes proches. Cela constitue donc un cas très défavorable pour les séismes proches.

Nous avons ensuite chercher des critères pour comparer la nocivité relative entre les séismes proches et lointains. Ces critères sont la durée du séisme et le nombre de cycles imposé à la structure. Le premier calcul consiste à passer sur une structure un séisme double, c'est à dire deux séismes identiques l'un à la suite de l'autre. Les spectres obtenus montrent de manière évidente que la durée du séisme est un critère de nocivité important. Cette remarque est intéressante car les séismes lointains ont généralement des durées bien supérieures aux séismes proches. Cela permet, dans une certaine mesure, d'expliquer pourquoi les séismes proches ne sont pas aussi agressifs que le laissait penser les SRO.

Le nombre de cycles inélastiques peut être un bon critère de nocivité car pour plusieurs matériaux, la résistance sous chargement cyclique est inférieure à celle sous chargement monotone. Nos résultats montrent que Taft, séisme lointain, impose aux structures un nombre de cycle nettement supérieur aux autres séismes. Or, la limite de ce critère tient au fait que Nice, autre séisme lointain, n'est pas aussi endommageant que Taft. Il faut préciser que Nice est un séisme artificiel et que sa durée est inférieure à 16s ; le faible nombre de cycle est sûrement dû à ces caractéristiques peu significatives.

Pour pouvoir statuer de manière plus sûre, il faudrait effectuer ces mêmes calculs pour de nombreux autres séismes. En effet, le faible nombre de séismes lointains (2) et de séismes proches (4) ne permettent pas d'établir des statistiques significatives dans un sens ou dans un autre. La moindre nocivité des séismes proches n'est donc pas établie rigoureusement. Il faut donc trouver d'autres critères de comparaison pour confirmer la tendance mise en évidence dans ce rapport.

La suite de ce stage va s'appuyer sur deux parties :

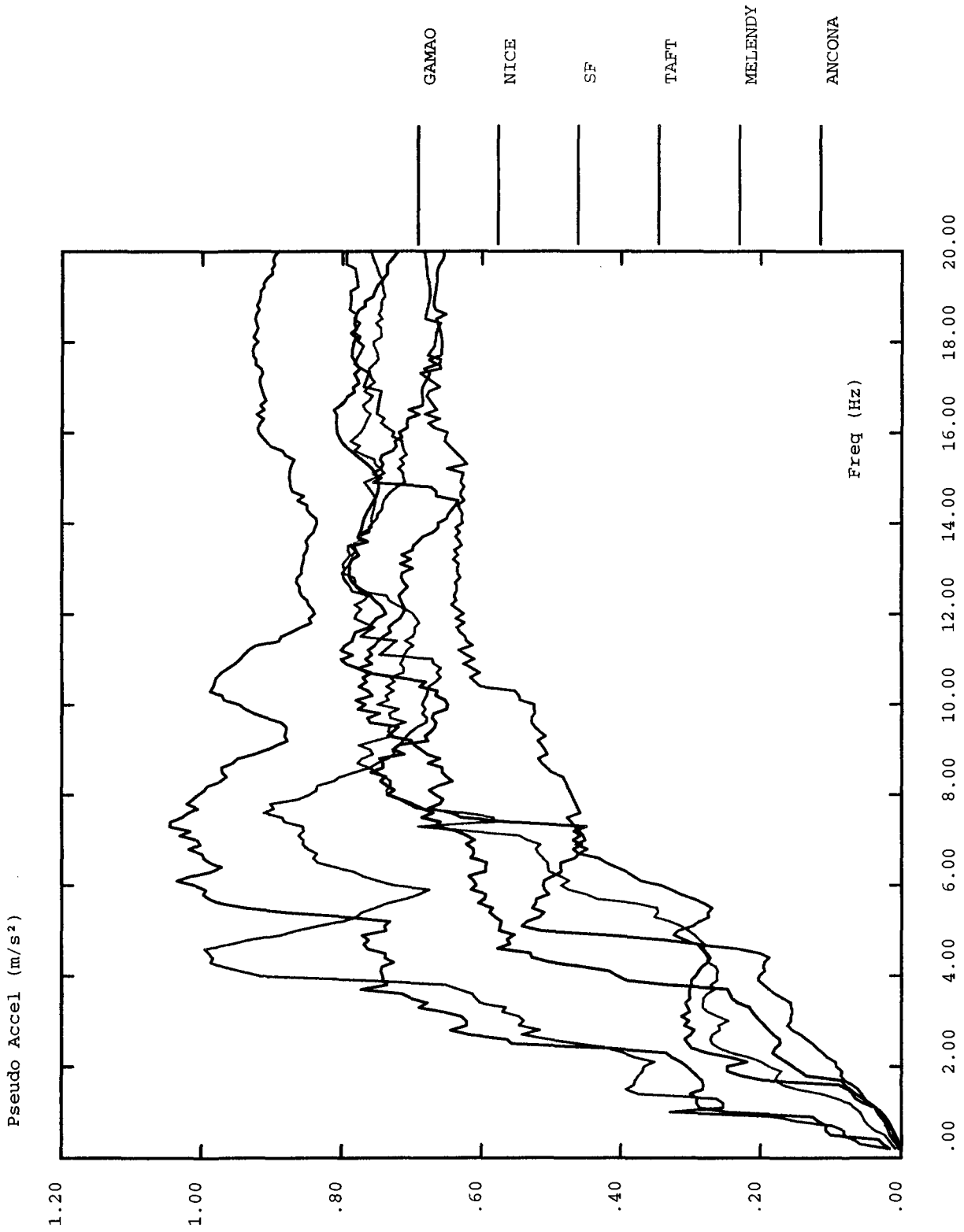
➤ premièrement, effectuer les calculs décrits dans ce rapport pour plusieurs autres accélérogrammes,

➤ deuxièmement, effectuer une approche énergétique et tenter d'apporter d'autres critères permettant de comparer la nocivité relative des séismes proches et lointains.

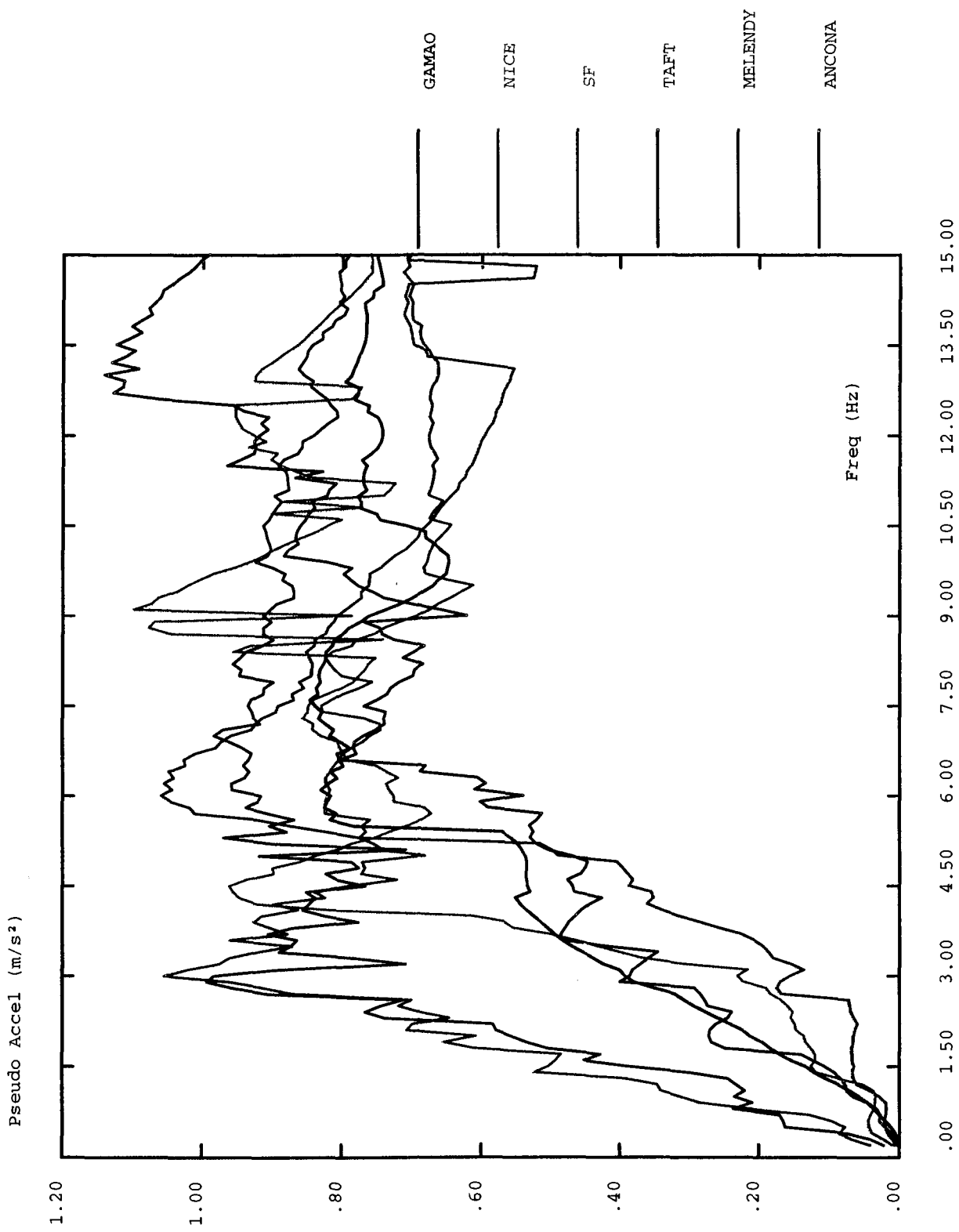
BIBLIOGRAPHIE

- [1] René-Jean GIBERT
"Vibrations des Structures", 1988.
- [2] R.P KENNEDY, S.A SHORT, & N.M NEWMARK
"The Response of a Nuclear Power Plant to Near-Field Moderate Magnitude Earthquakes"
- [3] Makoto KAMIYAMA
"Spectral Characteristics of Strong Ground Motion in Terms of Peak Values, 1995
- [4] J.M ARIBERT et N EDJTEMAI
"Prise en Compte de la Ductilité dans la Réponse Spectrale à un Séisme"
Construction Métallique, n°4-1981.
- [5] P LABBE, A PECKER et J.P TOURET
"Comportement Sismique des Installations Industrielles"
Volume 2, 1994.

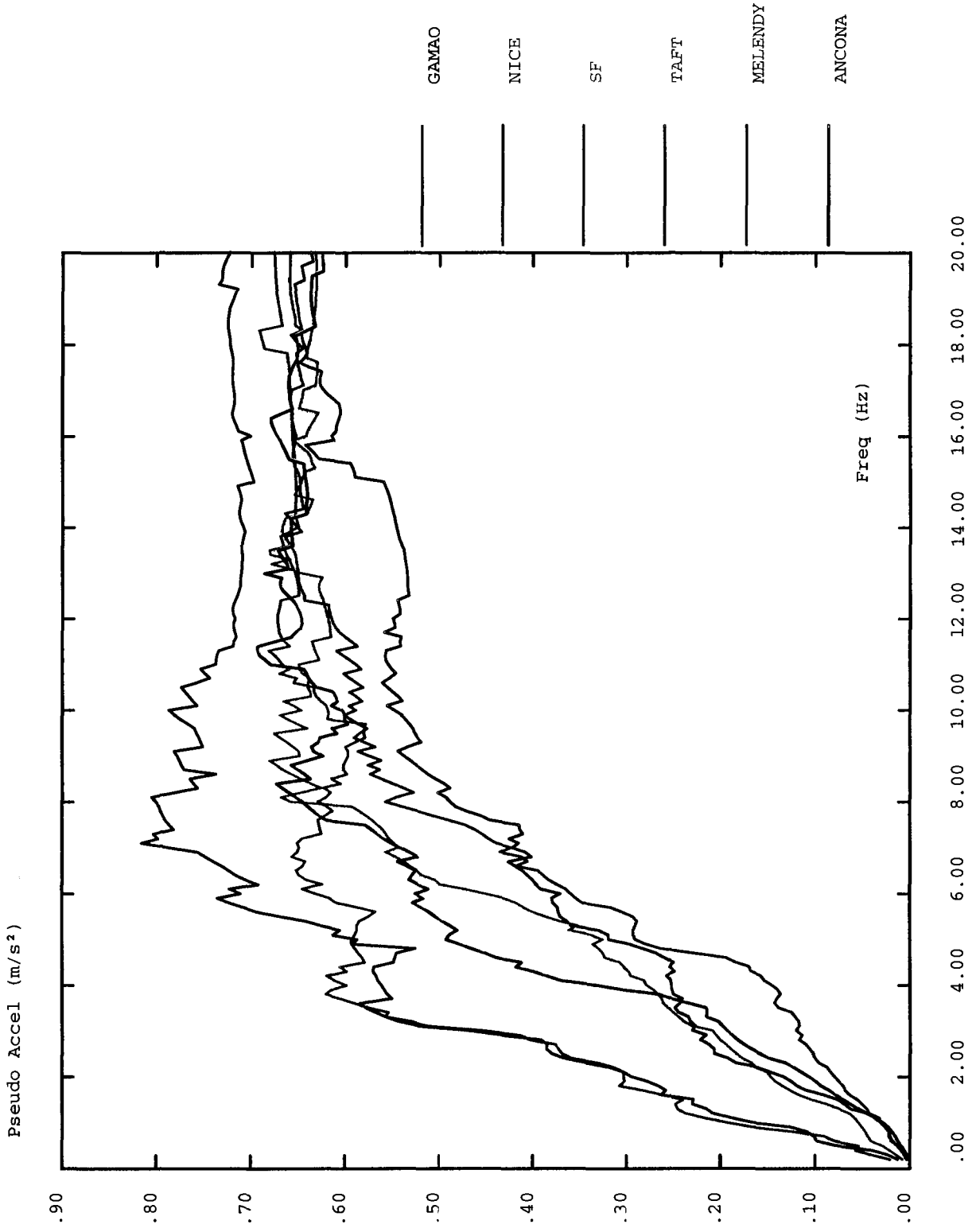
ANNEXE 1



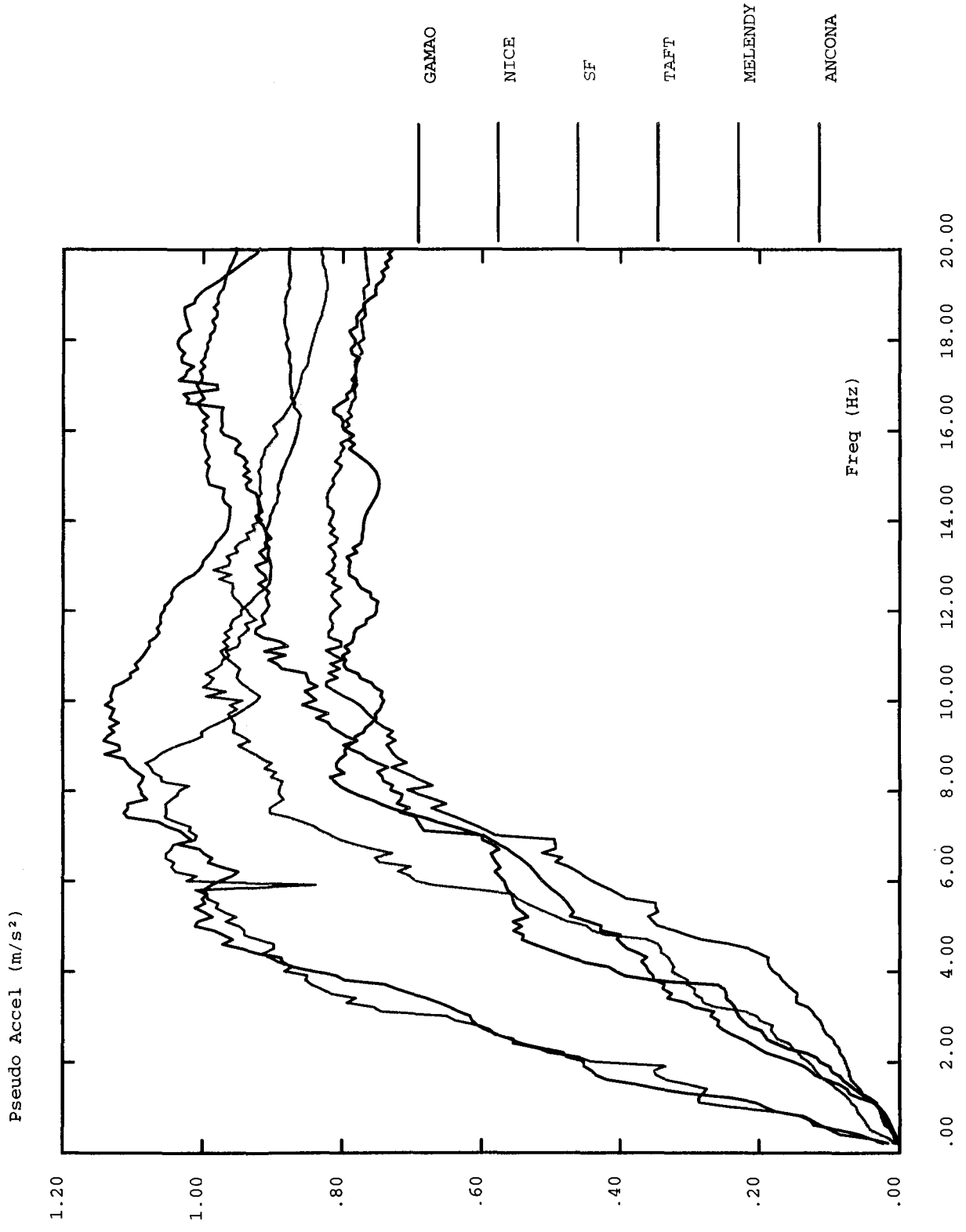
Spectre inelastique en Pseudo-accel, Modele EPP, e=5%, μ=6



Spectre inelastique Pseudo-accel, Modele Elas non lin, e=5%, μ=6

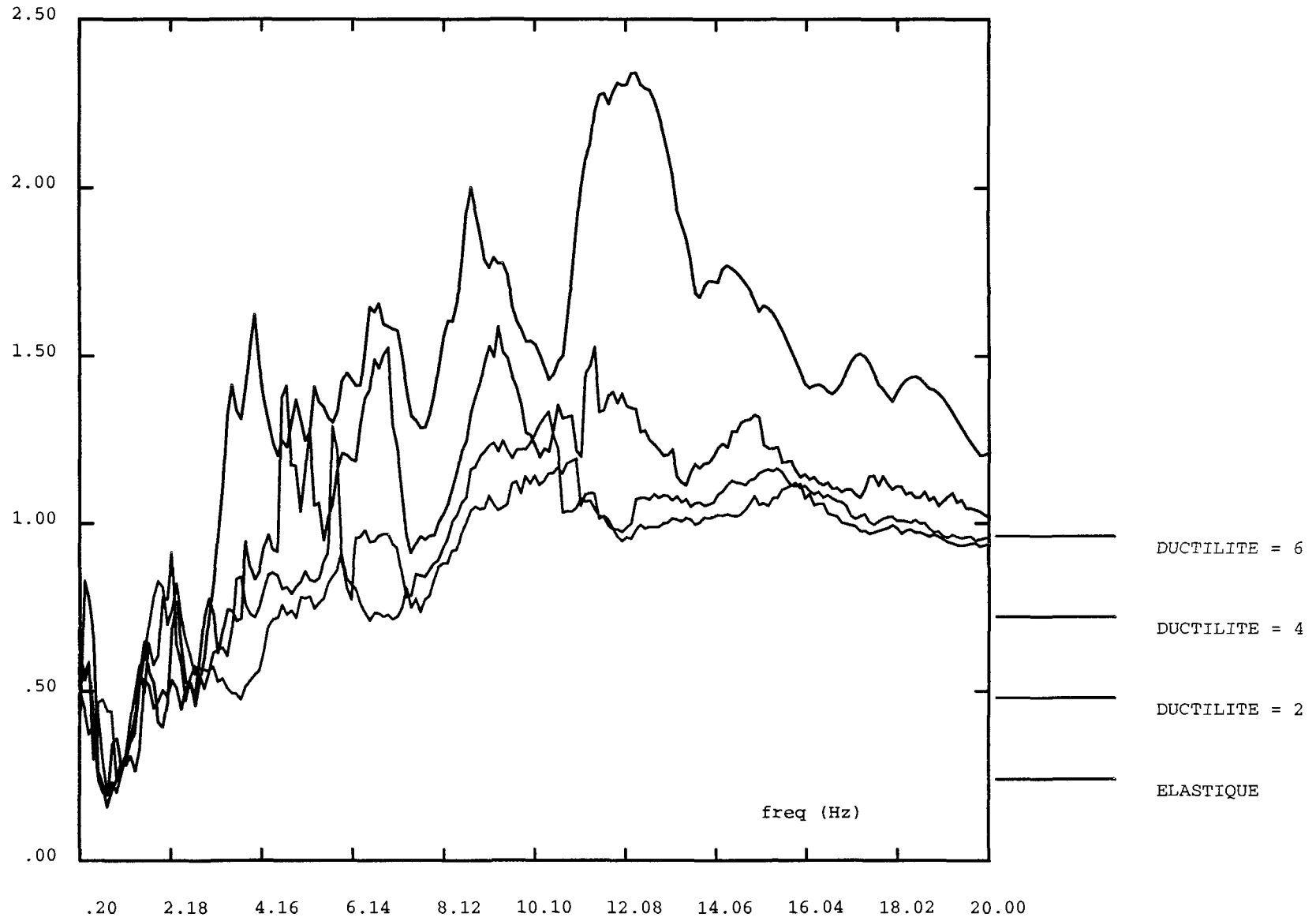


Spectre inelastique en Pseudo-accel, Modele ecrou cine 0.1, e=5%, μ=6



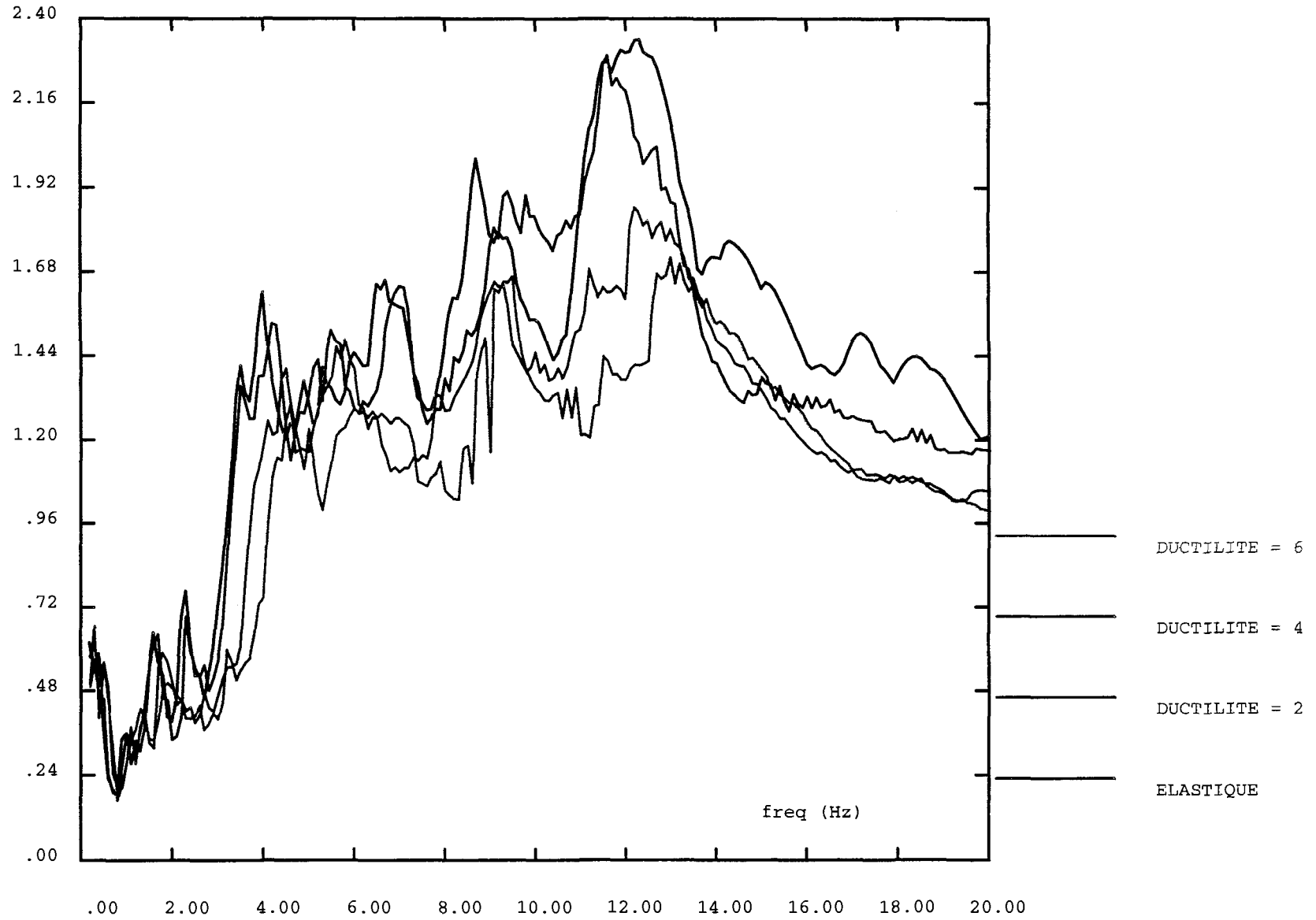
Spectre inelastique en Pseudo-accel, modele TAKEDA, e=5%, μ=6

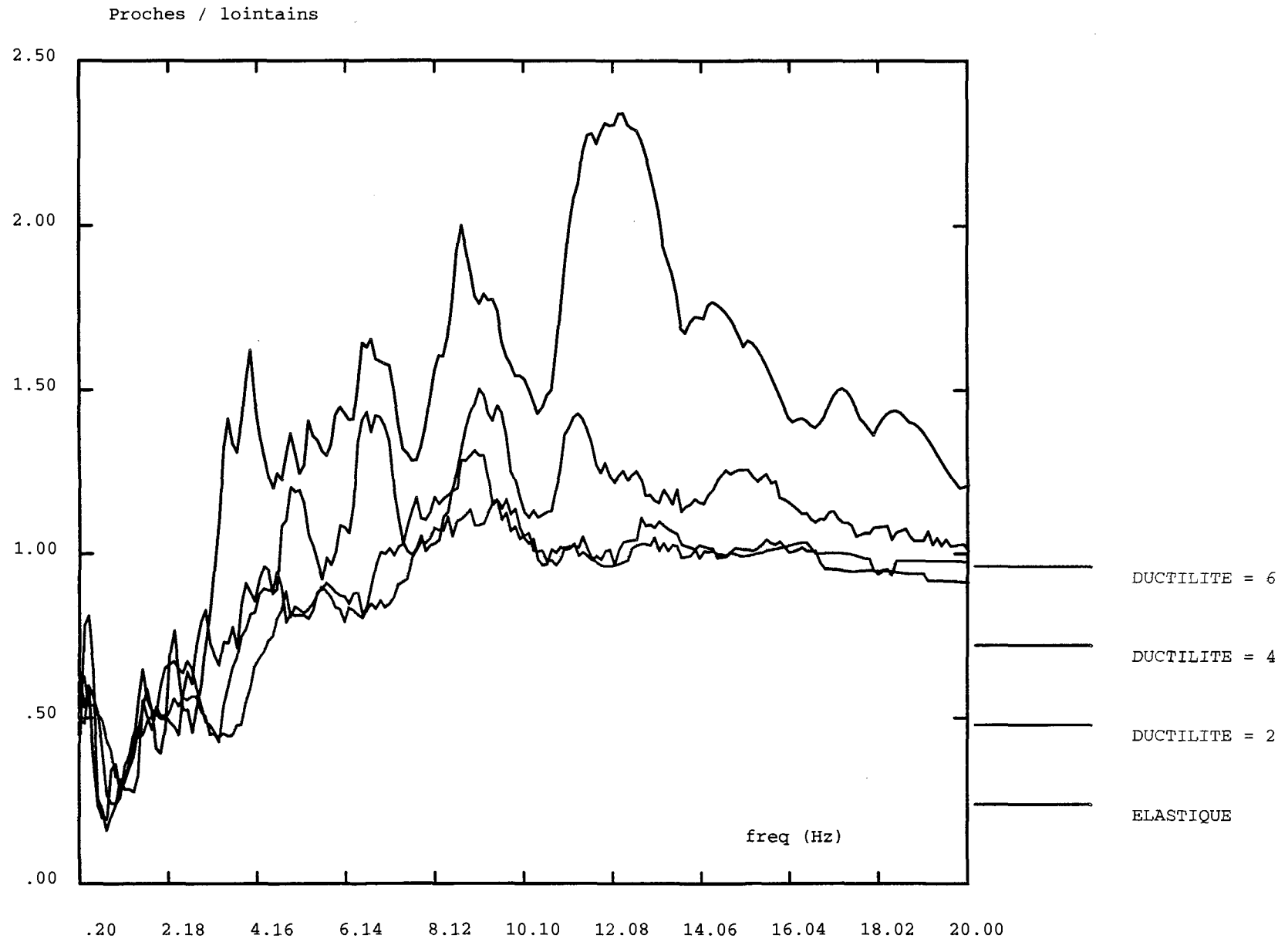
Proches / lointains



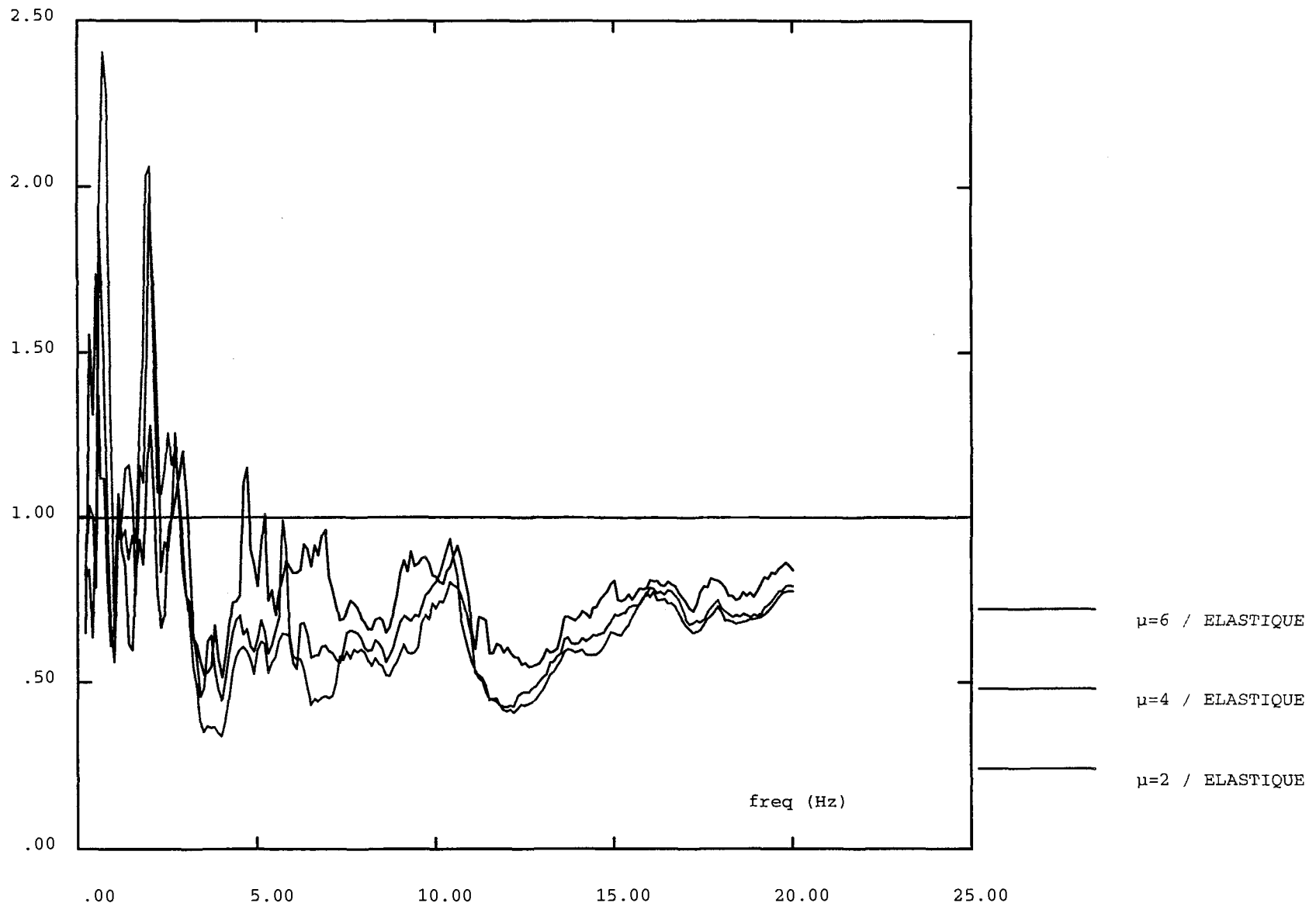
Modele EPP

Rapport des proches/Lointains

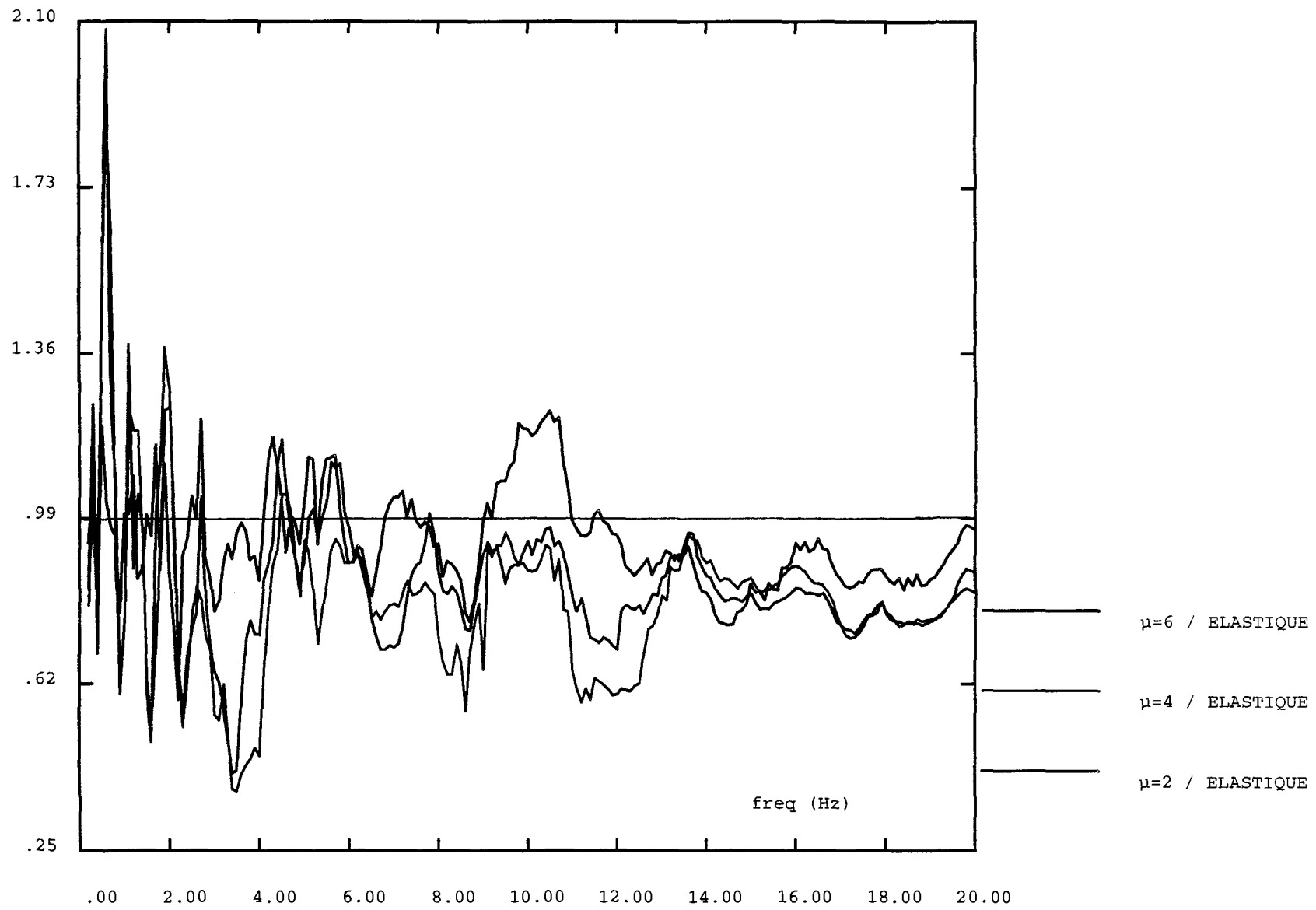




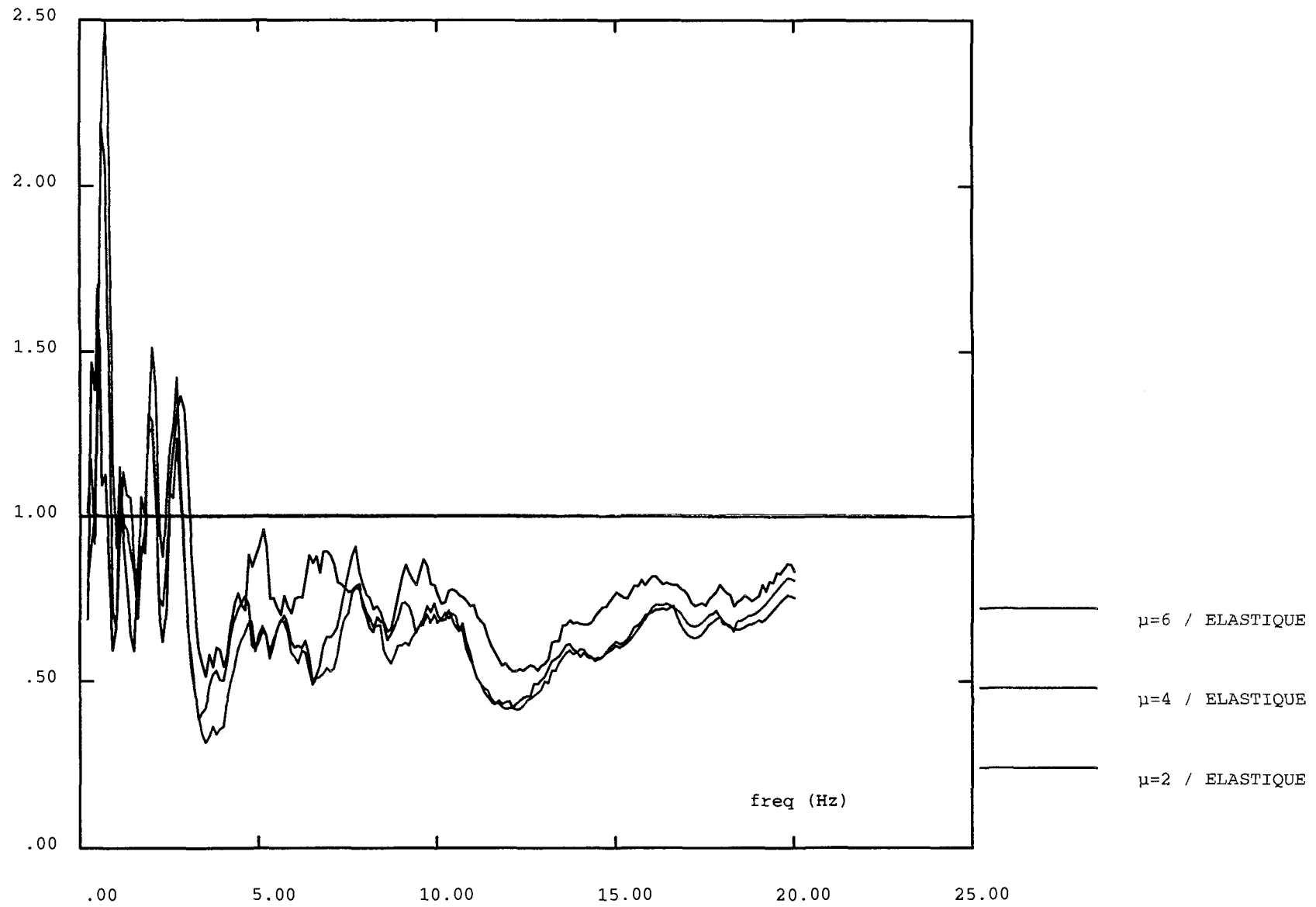
Modele ecrou cine 0.1



Modele EPP



Modele Elas non lin



Modele **EBROUÏSSAGE**

ANNEXE 2

```
*****
****
**** Calcul de spectres inélastiques par amélioration de SPON ****
****
*****
```

```
*** sauvegarde des évolutions ***
```

```
opti sauv 'specinelas_resu';
*opti trac ps;
```

```
*** restitution des signaux ***
```

```
opti rest '../signal/SIGNAUX.sortgibi';
rest;
```

```
*****
**          Normalisation de l'accélerogramme à 1g          **
** avec calcul des temps finaux des accélérogrammes **
** et on impose la même discrétisation temporelle **
*****
```

```
accel1 = extr signal1 'ORDO';
resu1 = MAXI accel1 'ABS' ;
accel = accel1 / resu1;
temps1 = extr signal1 'ABSC';
fin1 = extr temps1 (dime temps1);
accel1 = ipol (prog 0. pas 0.008 fin1) temps1 accel;
signal1 = evol manu (prog 0. pas 0.008 fin1) accel1 ;
```

```
accel2 = extr signal2 'ORDO';
resu2 = MAXI accel2 'ABS' ;
accel = accel2 / resu2;
temps2 = extr signal2 'ABSC';
fin2 = extr temps2 (dime temps2);
accel2 = ipol (prog 0. pas 0.008 fin2) temps2 accel;
signal2 = evol manu (prog 0. pas 0.008 fin2) accel2;
```

```
accel3 = extr signal3 'ORDO';
resu3 = MAXI accel3 'ABS' ;
accel = accel3 / resu3;
temps3 = extr signal3 'ABSC';
fin3 = extr temps3 (dime temps3);
accel3 = ipol (prog 0. pas 0.008 fin3) temps3 accel;
signal3 = evol manu (prog 0. pas 0.008 fin3) accel3;
```

```
accel4 = extr signal4 'ORDO';
resu4 = MAXI accel4 'ABS' ;
accel = accel4 / resu4;
temps4 = extr signal4 'ABSC';
fin4 = extr temps4 (dime temps4);
accel4 = ipol (prog 0. pas 0.008 fin4) temps4 accel;
signal4 = evol manu (prog 0. pas 0.008 fin4) accel4;
```

```
accel5 = extr signal5 'ORDO';
resu5 = MAXI accel5 'ABS' ;
accel = accel5 / resu5;
temps5 = extr signal5 'ABSC';
fin5 = extr temps5 (dime temps5);
** le signal est contracté, il faut donc le 'décomprimé' **
temps5 = (temps5 * ((3)**0.5));
accel5 = ipol (prog 0. pas 0.008 fin5) temps5 accel;
signal5 = evol manu (prog 0. pas 0.008 fin5) accel5;
```

```

*****
*
*
*  signal1 = ANCONA
*  signal2 = MELENDY
*  signal3 = TAFT
*  signal4 = SF
*  signal5 = NICE
*
*
*
*****

```

```

*****
****
****      spectres elastiques en deplacement      ****
****              et pseudo-accélération          ****
**** sur même base de discrétisation temporelle ****
****              et donc même fréquence finale   ****
*****

```

*** amortissement ***

pr1 = (prog 0.05);

*** ductilités différentes ***

pr2 = (prog 2. 0.);

pr3 = (prog 4. 0.);

pr4 = (prog 6. 0.);

specel1 = spo signal1 amor pr1 coul roug depl;

specel2 = spo signal2 amor pr1 coul bleu depl;

specel3 = spo signal3 amor pr1 coul vert depl;

specel4 = spo signal4 amor pr1 coul turq depl;

specel5 = spo signal5 amor pr1 coul rose depl;

*** Méthode d'obtention des courbes enveloppes ***

i=0;

*** extraction des ordonnées ***

ordo1 = extr specel1 ordo ;

ordo2 = extr specel2 ordo ;

ordo3 = extr specel3 ordo ;

ordo4 = extr specel4 ordo ;

ordo5 = extr specel5 ordo ;

ordel = prog;

ordep = prog;

listmin = (lect (dime ordo1) (dime ordo2) (dime ordo3)
(dime ordo4) (dime ordo5));

listmin = mini listmin;

REPE bou listmin;

i = i+1;

ord3_i = extr ordo3 i;

ord5_i = extr ordo5 i;

SI (ord3_i < ord5_i);

ordel_i = ord3_i ;


```
        SINON;
        ordel_i = ord5_i;
        FINSI;
ordel = ordel et (prog ordel_i);
```

```
ord1_i = extr ordol i;
ord2_i = extr ordo2 i;
ord4_i = extr ordo4 i;
        SI (ord1_i > ord2_i);
        ordepi = ord1_i ;
        SINON ;
        ordepi = ord2_i;
        FINSI;
        SI (ordepi > ord4_i);
        ordepi = ordepi;
        SINON ;
        ordepi = ord4_i;
        FINSI;
ordep = ordep et (prog ordepi);
```

```
FIN bou;
```

```
*** tracé des spectres élastiques en déplacement ***
```

```
dess (specel1 et specel2 et specel3 et specel4 et specel5)
      'XBOR' 0.2 5.
      TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Depl (m)' TITR 'e=5%',
ANC=roug,MEL=bleu,TAFT=vert,SF=turq,NICE=rose';
```

```
specella = spo signal1 amor pr1 coul roug acce;
specel2a = spo signal2 amor pr1 coul bleu acce;
specel3a = spo signal3 amor pr1 coul vert acce;
specel4a = spo signal4 amor pr1 coul turq acce;
specel5a = spo signal5 amor pr1 coul rose acce;
```

```
*** Courbes enveloppes ***
```

```
i=0;
```

```
*** extraction des ordonnées ***
```

```
ordol = extr specella ordo ;
ordo2 = extr specel2a ordo ;
ordo3 = extr specel3a ordo ;
ordo4 = extr specel4a ordo ;
ordo5 = extr specel5a ordo ;
```

```
ordela = prog;
ordepa = prog;
```

```
listmin = (lect (dime ordol) (dime ordo2) (dime ordo3)
           (dime ordo4) (dime ordo5));
listmin = mini listmin;
```

```
REPE bou listmin;
```

```
i = i+1;
```

```
ord3_i = extr ordo3 i;
ord5_i = extr ordo5 i;
```

```
        SI (ord3_i < ord5_i);
        ordela_i = ord3_i ;
        SINON;
        ordela_i = ord5_i;
```

```

      FINSI;
ordela = ordela et (prog ordela_i);

ord1_i = extr ordol i;
ord2_i = extr ordo2 i;
ord4_i = extr ordo4 i;
      SI (ord1_i > ord2_i);
      ordepa_i = ord1_i ;
      SINON ;
      ordepa_i = ord2_i;
      FINSI;
      SI (ordepa_i > ord4_i);
      ordepa_i = ordepa_i;
      SINON ;
      ordepa_i = ord4_i;
      FINSI;
ordepa = ordepa et (prog ordepa_i);

FIN bou;

```

*** tracé des spectres élastiques en pseudo-accel ***

```

dess (specella et specel2a et specel3a et specel4a et specel5a)
      'XBOR' 0.2 15.
      TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Pseudo-Accel (m/s2)' TITR 'e=5%,
ANC=roug,MEL=bleu,TAFT=vert,SF=turq,NICE=rose';

```

```

*****
*****
***** spectres inélastiques en déplacement avec ductilité appelée *****
*****      modèle élastoplastique      *****
*****

```

```

specin1 = spon dema sign signal1 spel specel1 depl
amor pr1 prop pr2 coul roug depl;
specin2 = spon dema sign signal2 spel specel2 depl
amor pr1 prop pr2 coul bleu depl;
specin3 = spon dema sign signal3 spel specel3 depl
amor pr1 prop pr2 coul vert depl;
specin4 = spon dema sign signal4 spel specel4 depl
amor pr1 prop pr2 coul turq depl;
specin5 = spon dema sign signal5 spel specel5 depl
amor pr1 prop pr2 coul rose depl;

```

*** Courbes enveloppes ***

```

i=0;

```

*** extraction des ordonnées ***

```

ordol = extr specin1 ordo ;
ordo2 = extr specin2 ordo ;
ordo3 = extr specin3 ordo ;
ordo4 = extr specin4 ordo ;
ordo5 = extr specin5 ordo ;

```

```

ordl = prog;
ordp = prog;

```

```

listmin = (lect (dime ordol) (dime ordo2) (dime ordo3)

```

```

        (dime ordo4) (dime ordo5));
listmin = mini listmin;

REPE bou listmin;
i = i+1;
ord3_i = extr ordo3 i;
ord5_i = extr ordo5 i;

        SI (ord3_i < ord5_i);
        ordl_i = ord3_i ;
        SINON;
        ordl_i = ord5_i;
        FINSI;
ordl = ordl et (prog ordl_i);

ord1_i = extr ordo1 i;
ord2_i = extr ordo2 i;
ord4_i = extr ordo4 i;
        SI (ord1_i > ord2_i);
        ordp_i = ord1_i ;
        SINON ;
        ordp_i = ord2_i;
        FINSI;
        SI (ordp_i > ord4_i);
        ordp_i = ordp_i;
        SINON ;
        ordp_i = ord4_i;
        FINSI;
ordp = ordp et (prog ordp_i);

FIN bou;

specin1a = spon dema sign signal1 spel specel1 depl
amor pr1 prop pr3 coul roug depl;
specin2a = spon dema sign signal2 spel specel2 depl
amor pr1 prop pr3 coul bleu depl;
specin3a = spon dema sign signal3 spel specel3 depl
amor pr1 prop pr3 coul vert depl;
specin4a = spon dema sign signal4 spel specel4 depl
amor pr1 prop pr3 coul turq depl;
specin5a = spon dema sign signal5 spel specel5 depl
amor pr1 prop pr3 coul rose depl;

*** courbes enveloppes ***

i=0;

** extraction des ordonnées **

ordol = extr specin1a ordo ;
ordo2 = extr specin2a ordo ;
ordo3 = extr specin3a ordo ;
ordo4 = extr specin4a ordo ;
ordo5 = extr specin5a ordo ;

ordla = prog;
ordpa = prog;

listmin = (lect (dime ordol) (dime ordo2) (dime ordo3)
        (dime ordo4) (dime ordo5));
listmin = mini listmin;

REPE bou listmin;
i = i+1;
ord3_i = extr ordo3 i;

```

```
ord5_i = extr ordo5 i;

      SI (ord3_i < ord5_i);
      ordla_i = ord3_i ;
      SINON;
      ordla_i = ord5_i;
      FINSI;
ordla = ordla et (prog ordla_i);
```

```
ord1_i = extr ordo1 i;
ord2_i = extr ordo2 i;
ord4_i = extr ordo4 i;
      SI (ord1_i > ord2_i);
      ordpa_i = ord1_i ;
      SINON ;
      ordpa_i = ord2_i;
      FINSI;
      SI (ordpa_i > ord4_i);
      ordpa_i = ordpa_i;
      SINON ;
      ordpa_i = ord4_i;
      FINSI;
ordpa = ordpa et (prog ordpa_i);
```

```
FIN bou;
```

```
specin1b = spon dema sign signal1 spel specel1 depl
amor pr1 prop pr4 coul roug depl;
specin2b = spon dema sign signal2 spel specel2 depl
amor pr1 prop pr4 coul bleu depl;
specin3b = spon dema sign signal3 spel specel3 depl
amor pr1 prop pr4 coul vert depl;
specin4b = spon dema sign signal4 spel specel4 depl
amor pr1 prop pr4 coul turq depl;
specin5b = spon dema sign signal5 spel specel5 depl
amor pr1 prop pr4 coul rose depl;
```

```
*** courbes enveloppes ***
i=0;
```

```
*** extraction des ordonnées ***
```

```
ordo1 = extr specin1b ordo ;
ordo2 = extr specin2b ordo ;
ordo3 = extr specin3b ordo ;
ordo4 = extr specin4b ordo ;
ordo5 = extr specin5b ordo ;
```

```
ordlb = prog;
ordpb = prog;
```

```
listmin = (lect (dime ordo1) (dime ordo2) (dime ordo3)
           (dime ordo4) (dime ordo5));
listmin = mini listmin;
```

```
REPE bou listmin;
```

```
i = i+1;
```

```
ord3_i = extr ordo3 i;
ord5_i = extr ordo5 i;
```

```
      SI (ord3_i < ord5_i);
      ordlb_i = ord3_i ;
      SINON;
      ordlb_i = ord5_i;
```

```

        FINSI;
ordlb = ordlb et (prog ordlb_i);

ord1_i = extr ordol i;
ord2_i = extr ordo2 i;
ord4_i = extr ordo4 i;
        SI (ord1_i > ord2_i);
        ordpb_i = ord1_i ;
        SINON ;
        ordpb_i = ord2_i;
        FINSI;
        SI (ordpb_i > ord4_i);
        ordpb_i = ordpb_i;
        SINON ;
        ordpb_i = ord4_i;
        FINSI;
ordpb = ordpb et (prog ordpb_i);

FIN bou;

```

***** Tracés de courbes *****

```

dess      (specin1 et specin2 et specin3 et specin4 et specin5)
          'XBOR' 0.2 5.
          TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Depl (m)' TITR 'e=5%,μ=2,
ANC=roug,MEL=bleu,TAFT=vert,SF=turq,NICE=rose';

```

```

dess      (specin1a et specin2a et specin3a et specin4a et specin5a)
          'XBOR' 0.2 5.
          TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Depl (m)' TITR 'e=5%,μ=4,
ANC=roug,MEL=bleu,TAFT=vert,SF=turq,NICE=rose';

```

```

dess      (specin1b et specin2b et specin3b et specin4b et specin5b)
          'XBOR' 0.2 5.
          TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Depl (m)' TITR 'e=5%,μ=6,
ANC=roug,MEL=bleu,TAFT=vert,SF=turq,NICE=rose';

```

```

*****
*****
***** spectres en déformation inélastique cumulée avec ductilité appelée *****
*****          modèle élastoplastique          *****
*****

```

```

*specum1 = spon dema sign signal1 spel specel1 depl
*amor pr1 prop pr2 coul roug epse;
*specum2 = spon dema sign signal2 spel specel2 depl
*amor pr1 prop pr2 coul bleu epse;
*specum3 = spon dema sign signal3 spel specel3 depl
*amor pr1 prop pr2 coul vert epse;
*specum4 = spon dema sign signal4 spel specel4 depl
*amor pr1 prop pr2 coul turq epse;
*specum5 = spon dema sign signal5 spel specel5 depl
*amor pr1 prop pr2 coul rose depl;

```

```

*specum1a = spon dema sign signal1 spel specel1 depl
*amor pr1 prop pr3 coul roug epse;
*specum2a = spon dema sign signal2 spel specel2 depl
*amor pr1 prop pr3 coul bleu epse;
*specum3a = spon dema sign signal3 spel specel3 depl
*amor pr1 prop pr3 coul vert epse;
*specum4a = spon dema sign signal4 spel specel4 depl

```

```

*amor pr1 prop pr3 coul turq epse;
*specum5a = spon dema sign signal5 spel specel5 depl
*amor pr1 prop pr3 coul rose epse;

*specum1b = spon dema sign signal1 spel specel1 depl
*amor pr1 prop pr4 coul roug epse;
*specum2b = spon dema sign signal2 spel specel2 depl
*amor pr1 prop pr4 coul bleu epse;
*specum3b = spon dema sign signal3 spel specel3 depl
*amor pr1 prop pr4 coul vert epse;
*specum4b = spon dema sign signal4 spel specel4 depl
*amor pr1 prop pr4 coul turq epse;
*specum5b = spon dema sign signal5 spel specel5 depl
*amor pr1 prop pr4 coul rose epse;

```

***** Tracés de courbes *****

```

*dess (specum1 et specum2 et specum3 et specum4 et specum5)
* 'XBOR' 0.2 7.
* TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Defo Cumul (m)' TITR 'e=5%,μ=2,
*ANC=roug,MEL=bleu,TAFT=vert,SF=turq,NICE=rose';
*
*dess (specum1a et specum2a et specum3a et specum4a et specum5a)
* 'XBOR' 0.2 7.
* TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Defo Cumul (m)' TITR 'e=5%,μ=4,
*ANC=roug,MEL=bleu,TAFT=vert,SF=turq,NICE=rose';
*
*dess (specum1b et specum2b et specum3b et specum4b et specum5b)
* 'XBOR' 0.2 7.
* TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Defo Cumul (m)' TITR 'e=5%,μ=6,
*ANC=roug,MEL=bleu,TAFT=vert,SF=turq,NICE=rose';
*

```

```

*****
***** spectres inélastiques en pseudoaccel avec ductilité appelée *****
***** modèle élastoplastique *****
*****

```

```

specac1 = spon dema sign signal1 spel specel1 depl
amor pr1 prop pr2 coul roug acce;
specac2 = spon dema sign signal2 spel specel2 depl
amor pr1 prop pr2 coul bleu acce;
specac3 = spon dema sign signal3 spel specel3 depl
amor pr1 prop pr2 coul vert acce;
specac4 = spon dema sign signal4 spel specel4 depl
amor pr1 prop pr2 coul turq acce;
specac5 = spon dema sign signal5 spel specel5 depl
amor pr1 prop pr2 coul rose acce;

```

*** courbes enveloppes ***
i=0;

*** extraction des ordonnées ***

```

ordo1 = extr specac1 ordo ;
ordo2 = extr specac2 ordo ;
ordo3 = extr specac3 ordo ;
ordo4 = extr specac4 ordo ;
ordo5 = extr specac5 ordo ;

```

```

ordal = prog;
ordap = prog;

```

```
listmin = (lect (dime ord01) (dime ord02) (dime ord03)
            (dime ord04) (dime ord05));
```

```
listmin = mini listmin;
```

```
REPE bou listmin;
```

```
i = i+1;
```

```
ord3_i = extr ord03 i;
```

```
ord5_i = extr ord05 i;
```

```
    SI (ord3_i < ord5_i);
```

```
    ordal_i = ord3_i ;
```

```
    SINON;
```

```
    ordal_i = ord5_i;
```

```
    FINSI;
```

```
ordal = ordal et (prog ordal_i);
```

```
ord1_i = extr ord01 i;
```

```
ord2_i = extr ord02 i;
```

```
ord4_i = extr ord04 i;
```

```
    SI (ord1_i > ord2_i);
```

```
    ordap_i = ord1_i ;
```

```
    SINON ;
```

```
    ordap_i = ord2_i;
```

```
    FINSI;
```

```
    SI (ordap_i > ord4_i);
```

```
    ordap_i = ordap_i;
```

```
    SINON ;
```

```
    ordap_i = ord4_i;
```

```
    FINSI;
```

```
ordap = ordap et (prog ordap_i);
```

```
FIN bou;
```

```
specac1a = spon dema sign signal1 spel specel1 depl
```

```
amor pr1 prop pr3 coul roug acce;
```

```
specac2a = spon dema sign signal2 spel specel2 depl
```

```
amor pr1 prop pr3 coul bleu acce;
```

```
specac3a = spon dema sign signal3 spel specel3 depl
```

```
amor pr1 prop pr3 coul vert acce;
```

```
specac4a = spon dema sign signal4 spel specel4 depl
```

```
amor pr1 prop pr3 coul turq acce;
```

```
specac5a = spon dema sign signal5 spel specel5 depl
```

```
amor pr1 prop pr3 coul rose acce;
```

```
*** courbes enveloppes ***
```

```
i=0;
```

```
*** extraction des ordonnées ***
```

```
ord01 = extr specac1a ordo ;
```

```
ord02 = extr specac2a ordo ;
```

```
ord03 = extr specac3a ordo ;
```

```
ord04 = extr specac4a ordo ;
```

```
ord05 = extr specac5a ordo ;
```

```
ordala = prog;
```

```
ordapa = prog;
```

```
listmin = (lect (dime ord01) (dime ord02) (dime ord03)
            (dime ord04) (dime ord05));
```

```
listmin = mini listmin;
```

```
REPE bou listmin;
```

```
i = i+1;
```

```

ord3_i = extr ordo3 i;
ord5_i = extr ordo5 i;

      SI (ord3_i < ord5_i);
      ordala_i = ord3_i ;
      SINON;
      ordala_i = ord5_i;
      FINSI;
ordala = ordala et (prog ordala_i);

ord1_i = extr ordo1 i;
ord2_i = extr ordo2 i;
ord4_i = extr ordo4 i;
      SI (ord1_i > ord2_i);
      ordapa_i = ord1_i ;
      SINON ;
      ordapa_i = ord2_i;
      FINSI;
      SI (ordapa_i > ord4_i);
      ordapa_i = ordapa_i;
      SINON ;
      ordapa_i = ord4_i;
      FINSI;
ordapa = ordapa et (prog ordapa_i);

FIN bou;

specac1b = spon dema sign signal1 spel specel1 depl
amor pr1 prop pr4 coul roug acce;
specac2b = spon dema sign signal2 spel specel2 depl
amor pr1 prop pr4 coul bleu acce;
specac3b = spon dema sign signal3 spel specel3 depl
amor pr1 prop pr4 coul vert acce;
specac4b = spon dema sign signal4 spel specel4 depl
amor pr1 prop pr4 coul turq acce;
specac5b = spon dema sign signal5 spel specel5 depl
amor pr1 prop pr4 coul rose acce;

*** courbes enveloppes ***
i=0;

*** extraction des ordonnées ***

ordo1 = extr specac1b ordo ;
ordo2 = extr specac2b ordo ;
ordo3 = extr specac3b ordo ;
ordo4 = extr specac4b ordo ;
ordo5 = extr specac5b ordo ;

ordalb = prog;
ordapb = prog;

listmin = (lect (dime ordo1) (dime ordo2) (dime ordo3)
           (dime ordo4) (dime ordo5));
listmin = mini listmin;

REPE bou listmin;
i = i+1;
ord3_i = extr ordo3 i;
ord5_i = extr ordo5 i;

      SI (ord3_i < ord5_i);
      ordalb_i = ord3_i ;
      SINON;
      ordalb_i = ord5_i;

```



```

        FINSI;
ordalb = ordalb et (prog ordalb_i);

ord1_i = extr ordol i;
ord2_i = extr ordo2 i;
ord4_i = extr ordo4 i;
        SI (ord1_i > ord2_i);
        ordapb_i = ord1_i ;
        SINON ;
        ordapb_i = ord2_i;
        FINSI;
        SI (ordapb_i > ord4_i);
        ordapb_i = ordapb_i;
        SINON ;
        ordapb_i = ord4_i;
        FINSI;
ordapb = ordapb et (prog ordapb_i);

FIN bou;

```

***** Tracés de courbes *****

```

dess (specac1 et specac2 et specac3 et specac4 et specac5)
      'XBOR' 0. 15.
      TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Pseudo Accel (m/s2)' TITR 'e=5%,μ=2,
ANC=roug,MEL=bleu,TAFT=vert,SF=turq,NICE=rose';

```

```

dess (specac1a et specac2a et specac3a et specac4a et specac5a)
      'XBOR' 0. 15.
      TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Pseudo Accel (m/s2)' TITR 'e=5%,μ=4,
ANC=roug,MEL=bleu,TAFT=vert,SF=turq,NICE=rose';

```

```

dess (specac1b et specac2b et specac3b et specac4b et specac5b)
      'XBOR' 0. 15.
      TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Pseudo Accel (m/s2)' TITR 'e=5%,μ=6,
ANC=roug,MEL=bleu,TAFT=vert,SF=turq,NICE=rose';

```

***** Sauvegarde des signaux et spectres *****

```

sauv sig* spec*;

```

```

*****
*****
***** Courbes enveloppe des Spectres Lointains et proches *****
*****
*****

```

```

freq = extr specel5 absc;
procel = evol manu freq ordel;
loinel = evol manu freq ordep;
procel = procel coul roug;
loinel = loinel coul bleu;
dess (procel et loinel) TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Depl enveloppe (m)'
      TITR 'Spectre elastique enveloppe, bleu=lain, rouge=proc';

```

```

freq = extr specel5a absc;
procela = evol manu freq ordela;
loinela = evol manu freq ordepa;
procela = procela coul roug;
loinela = loinela coul bleu;

```

```

dess (procela et loinele) TITX 'Freq (Hz)'
      TITY 'Pseudaccel enveloppe (m/s2)'
      TITR 'Spectre elastique enveloppe, bleu=lain, rouge=proc';

freq = extr specin5 absc;
procin = evol manu freq ordl;
loinin = evol manu freq ordp;
procin = procin coul roug;
loinin = loinin coul bleu;
dess (procin et loinin) TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Depl enveloppe (m)'
      TITR 'Specinelastique enveloppe  $\mu=2$ ,bleu=lain, rouge=proc';

freq = extr specin5a absc;
procina = evol manu freq ordla;
loinina = evol manu freq ordpa;
procina = procina coul roug;
loinina = loinina coul bleu;
dess (procina et loinina) TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Depl enveloppe (m)'
      TITR 'Specinelastique enveloppe  $\mu=4$ ,bleu=lain, rouge=proc';

freq = extr specin5b absc;
procinb = evol manu freq ordlb;
loininb = evol manu freq ordpb;
procinb = procinb coul roug;
loininb = loininb coul bleu;
dess (procinb et loininb) TITX 'Freq (Hz)' TITY 'Depl enveloppe (m)'
      TITR 'Specinelastique enveloppe  $\mu=6$ ,bleu=lain, rouge=proc';

freq = extr specac5 absc;
procac = evol manu freq ordal;
loinac = evol manu freq ordap;
procac = procac coul roug;
loinac = loinac coul bleu;
dess (procac et loinac) TITX 'Freq (Hz)'
      TITY 'Pseudaccel enveloppe (m/s2)'
      TITR 'Specinelastique enveloppe  $\mu=2$ ,bleu=lain, rouge=proc';

freq = extr specac5a absc;
procaca = evol manu freq ordala;
loinaca = evol manu freq ordapa;
procaca = procaca coul roug;
loinaca = loinaca coul bleu;
dess (procaca et loinaca) TITX 'Freq (Hz)'
      TITY 'Pseudaccel enveloppe (m/s2)'
      TITR 'Specinelastique enveloppe  $\mu=4$ ,bleu=lain, rouge=proc';

freq = extr specac5b absc;
procacb = evol manu freq ordalb;
loinacb = evol manu freq ordapb;
procacb = procacb coul roug;
loinacb = loinacb coul bleu;
dess (procaca et loinaca) TITX 'Freq (Hz)'
      TITY 'Pseudaccel enveloppe (m/s2)'
      TITR 'Specinelastique enveloppe  $\mu=6$ ,bleu=lain, rouge=proc';

fin;

```