

Communication n° 5.2

COMPARAISON DE METHODES
DE TRANSFERT DE SPECTRES

Philippe MAUREL^{*}, Jean-Pierre FIESCHI^{*}

ABSTRACT

Several spectrum transfer methods are available in the existing literature, which involves selection problems for the computer.

SGN has performed a comparative study of four methods : the comparative study diagram and the analysis of results are given after a brief summary of the theoretical justification of these methods.

Finally, a list of recent method references is given.

1. DONNEES SISMQUES A PRENDRE EN COMPTE POUR LE CALCUL DES EQUIPEMENTS

L'étude du comportement sous séisme d'un équipement lié à une structure porteuse nécessite la connaissance de la réponse sismique de la structure au point qui tient cet équipement. Deux types de réponses sont possibles :

- soit un accélérogramme, obtenu par transfert de l'accélérogramme du sol (méthode d'intégration directe ou d'intégration sur base modale),
- soit un spectre, obtenu ou bien à partir de l'accélérogramme au point considéré ou bien par transfert du spectre de sol.

Le premier type de réponse, s'il permet une étude plus rigoureuse de l'équipement, présente plusieurs inconvénients :

- temps de calcul longs et coûteux
- absence le plus souvent d'accélérogramme contractuel.

Aussi est-on amené très fréquemment à utiliser le deuxième type de réponse, par transfert du spectre de sol.

* SGN - Société Générale pour les Techniques Nouvelles - BP 30 -
78184 - Saint-Quentin en Yvelines -

Il n'existe pas de méthode consacrée de transfert de spectre ; nombreux sont les auteurs qui, ces dernières années, ont proposé leur propre approche du problème et il n'est pas aisé, en l'absence de tests sur l'ensemble des méthodes, de choisir la meilleure.

Aussi SGN, ayant eu, dans le cadre de la réalisation de l'usine de retraitement UP3 de la Hague, à dimensionner de nombreux équipements au séisme, a décidé de comparer certaines méthodes parmi les plus connues ; ces méthodes sont analysées succinctement dans le chapitre suivant.

2. LES METHODES DE TRANSFERT DE SPECTRES-ANALYSE THEORIQUE

2.1 Méthode Biggs

Il s'agit de la méthode la plus ancienne. Bien connue de tous, elle est décrite dans l'article "Seismic Analysis of equipment mounted on a massive structure" par J.M. Biggs et J.M. Roesset paru dans "Seismic Design for Nuclear Power Plants" (MIT Press Cambridge M.A. 1970).

Rappelons brièvement les bases théoriques de cette méthode, qui découlent du constat suivant :

- un équipement très rigide suit le mouvement de son support et son accélération maximale est celle de son support.
- un équipement très souple est insensible au mouvement de la structure et son accélération maximale est celle de ce même équipement posé directement sur le sol.

Entre ces deux extrêmes, il existe un phénomène de résonance entre équipement et structure, similaire à celui affectant un système soumis à un mouvement sinusoïdal.

On suppose donc l'équipement soumis à l'accélération harmonique amortie de son support, pour chaque mode propre de la structure, et on en déduit l'accélération maximale de l'équipement pour le mode considéré de la structure. Pour un équipement plutôt souple, cette approche n'est plus acceptable et on considère alors l'équipement soumis au mouvement direct du

sol avec amplification, due à la structure, égale à celle obtenue dans le cas où la structure serait soumise à une accélération harmonique, de fréquence celle de l'équipement. On obtient ainsi deux expressions de l'accélération maximale de l'équipement, l'une applicable quand l'équipement est plutôt rigide, l'autre quand ce dernier est plutôt souple ; une limite entre "rigide" et "souple" a été déterminée par comparaison avec une étude transitoire.

L'accélération maximale de l'équipement (pour un mode donné) engendrée par l'ensemble des modes de la structure, est ensuite obtenue par sommation quadratique des diverses accélérations déterminées ci-dessus.

2.2 Méthode Peters

Plus récente, cette méthode est exposée dans l'article "Détermination of floor response spectra on the basis of the response spectrum method" par K.A. Peters, D. Schmitz et U. Wagner, paru dans "Nuclear Engineering and Design 44 (1977)".

L'approche théorique est très différente de celle de la précédente méthode.

On considère un équipement à 1 degré de liberté lié à une structure à N degrés de liberté ; l'ensemble ainsi constitué est un système à $(N+1)$ degrés de liberté pour lequel on peut exprimer, en particulier, l'accélération du $(N+1)$ ième degré de liberté, c'est-à-dire de l'équipement.

Un passage à la limite (on fait tendre vers 0 la masse de l'équipement) permet d'écrire l'accélération de l'équipement en fonction des caractéristiques modales de la structure dans les deux cas suivants :

- a) la fréquence de l'équipement est éloignée de celles de la structure : une majoration de l'accélération de l'équipement est alors obtenue par sommation quadratique des contributions de l'équipement et de chacun des modes de la structure.
- b) la fréquence de l'équipement est proche de l'une de celles de la structure : la majoration de l'accélération de l'équipement est obtenue de

la même façon, mais la contribution du mode dont la fréquence est proche de celle de l'équipement devient prépondérante, sa valeur étant obtenue à partir de considérations statistiques (amplification dans un système à 2 degrés de liberté soumis à un signal aléatoire stationnaire de densité spectrale constante).

2.3 Programme TIROIR

On peut trouver une justification théorique du programme TIROIR dans l'article "Méthodes usuelles d'analyse sismique des Centrales - Obtention directe des spectres de plancher - Application à une Centrale à neutrons rapides et une Centrale à eau pressurisée" par M. Livolant et F. Jeanpierre - Réunion de spécialistes sur la conception antisismique des installations nucléaires - Paris 1-3/12/1975 - CEA - CONF - 3438 -

L'idée de départ est de considérer un spectre de plancher comme la réponse moyenne d'une structure à une famille de signaux, représentant l'excitation sismique, et de la forme : $S(t) = E(t).f(t)$

$E(t)$ étant une fonction à variation lente, la même pour toutes les $S(t)$, et $f(t)$ une fonction aléatoire et stationnaire, à variation rapide.

Cette forme de $S(t)$ permet d'exprimer le mouvement d'un oscillateur en fonction de l'enveloppe $E(t)$ et de la transformée de Fourier du signal.

Ce résultat est étendu ensuite au mouvement d'une structure par combinaison des mouvements de ses modes propres.

Les spectres de plancher s'obtiennent en définitive à partir de l'enveloppe de l'accélération du sol (fonction $E(t)$) et du spectre de Fourier de cette même accélération ; le programme TIROIR adopte une enveloppe $E(t)$ de forme sinusoïdale ou maxwellienne et déduit le spectre de Fourier de l'accélération du sol du spectre de sol pour un amortissement nul.

2.4. Méthode Sackman

La plus récente des quatre, cette méthode a fait l'objet de l'article "Equipment response spectra for nuclear power plant systems" de

J.L. Sackman et J.M. Kelly, paru dans "Nuclear Engineering and Design 57 (1980)".

On considère un équipement à un degré de liberté lié à une structure à N degrés de liberté ; après décomposition des mouvements sur les modes propres et introduction des transformées de Laplace, on peut exprimer assez simplement l'accélération de l'équipement en fonction de l'accélération du sol et des caractéristiques modales de la structure (les accélérations interviennent par leurs transformées de Laplace).

La transformation inverse de Laplace associée à quelques simplifications judicieuses conduit à l'expression de l'accélération de l'équipement, de la forme :

$$\ddot{u}(t) = \int_0^t \ddot{u}_G(\tau) \left[\sum_{m \neq n}^N \frac{\Omega_m}{1 - \left(\frac{\Omega_m}{\omega}\right)^2} q_m \phi_{r,m} e^{-\beta_m \Omega_m(t-\tau)} \sin \Omega_m(t-\tau) + \sum_{m=n}^N \frac{\omega}{1 - \left(\frac{\omega}{\Omega_m}\right)^2} q_m \phi_{r,m} e^{-\beta \omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) + \ddot{u}_G(t-\tau) \right] d\tau$$

(n : indice d'un mode dont la fréquence est proche de celle de l'équipement). $\ddot{u}_G(t)$ étant le terme prépondérant, dû à la proximité d'une fréquence propre et de la fréquence de l'équipement.

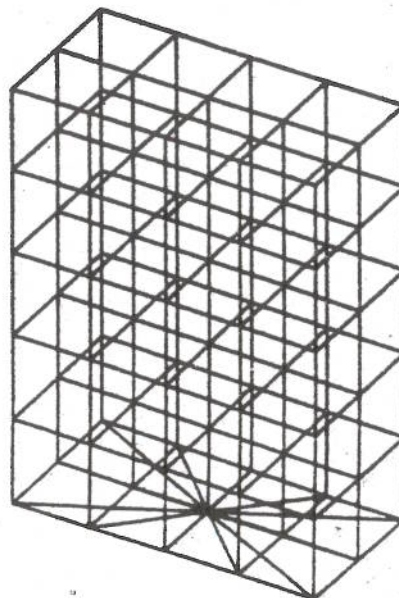
La majoration de la fonction $\ddot{u}(t)$ fournit le spectre de plancher ; dans cette majoration, les contributions des modes sont additionnées quadratiquement et deux expressions différentes sont obtenues, selon que l'équipement soit en résonance ou non avec un mode de structure.

3. COMPARAISON DES RESULTATS

3.1 Méthodologie adoptée

3.1.1 Modélisation de la structure

Il s'agit d'une structure composée de poutres et plaques, de dimensions 24 x 12 x 30 m et de masse 5575 tonnes.



L'interaction sol-structure intervient par ressorts de sol.

3.1.2 Programmes utilisés

STARDYNE : calcul de la rigidité de la structure et de ses modes propres.

STARDYNE : calcul des accélérogrammes aux noeuds de la structure, par
(DYNRE 1) intégration sur base modale et à partir des accélérogrammes de sol.

STARDYNE : calcul des spectres de sol ou de plancher à partir des
(DYNRE 5) accélérogrammes correspondants

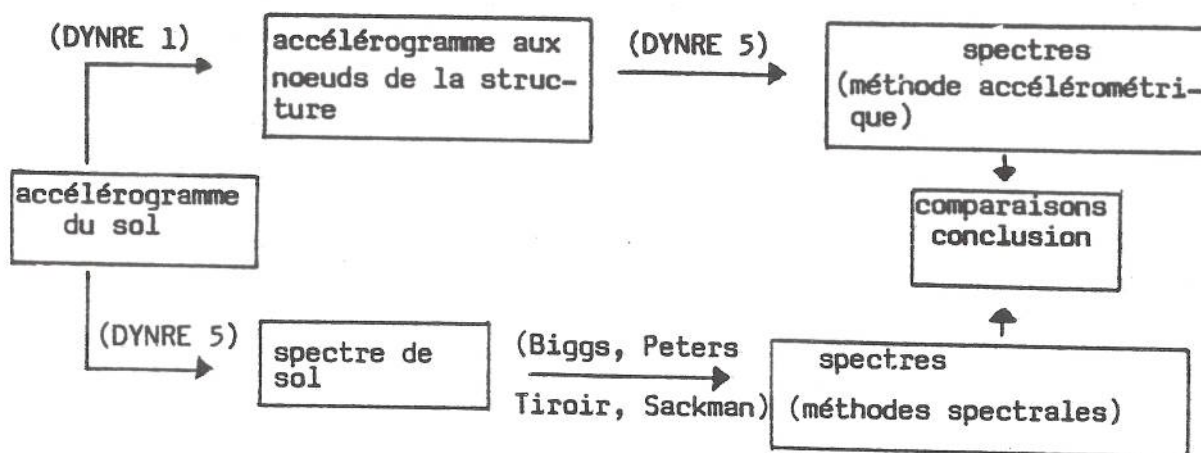
TIROIR : module CASTEM calculant des spectres de plancher

Les méthodes de transfert Biggs, Peters et Sackman ont fait l'objet de programmes de calcul à partir des formulations figurant dans les références du chapitre 2.

3.1.3 Schéma des études effectuées

Les résultats obtenus par les différentes méthodes étudiées ont été comparés à ceux fournis par un transfert d'accélérogramme (méthode témoin).

A cet effet, le schéma suivant a été adopté :



3.1.4 Accélérogramme de sol à la base de la structure

Il s'agit de l'accélérogramme de San Fernando du 9/2/71 composante N90 E - référence II G 108 71-022-0 - arrêté à 16 s.

3.1.5 Données de la méthode accélérométrique

Cette méthode est celle par transfert d'accélérogramme.

L'accélérogramme de sol est appliqué au modèle simultanément dans les trois directions principales avec les coefficients 1,1 et 2/3 -

- nombre de modes propres pris en compte : 20
- amortissement de la structure : 7 % sur tous les modes.

Les spectres obtenus sont donnés pour 2 % et 5 % d'amortissement de l'équipement ; ils résultent d'une combinaison quadratique des effets de chaque direction de séisme.

3.1.6 Données des méthodes spectrales

Le spectre de sol est appliqué au modèle simultanément dans les trois directions principales avec les coefficients 1,1 et 2/3

- nombre de modes propres pris en compte : 20
- amortissement de la structure : 7 % sur tous les modes.

Les spectres de plancher sont obtenus par combinaison quadratique sur les trois directions de séisme et donnés pour 2 % et 5 % d'amortissement.

3.2 Résultats de la comparaison

Les spectres obtenus, en 8 noeuds répartis dans le modèle, par les quatre méthodes spectrales sont comparés à ceux fournis comme référence par la méthode accélérométrique.

Cette comparaison porte sur les valeurs des fréquences des pics et sur les valeurs de ces pics (voir tableau comparatif plus loin).

On constate essentiellement que :

3.2.1 Fréquences des pics :

- toutes les méthodes sont bonnes pour la position du 1° pic.
- la méthode Biggs s'écarte plus (2,5 Hz au plus) que les autres méthodes (1 Hz au plus) pour la position du 2° pic.

3.2.2 Valeurs des pics :

- pour la valeur du premier pic, la méthode Biggs est très majorante (entre 30 % et 150 %), les méthodes Sackman et Peters sont bonnes (80 % des points à moins de 10 % d'erreur) et Tiroir est majorant (environ 15 %).
- pour la valeur du deuxième pic, la répartition est la suivante :

pourcentage d'erreur méthode	≤ 12 %	≤ 25 %	≤ 50 %	≤ 100 %	> 100 %
Biggs	53 %	58 %	79 %	95 %	5 %
Peters	0 %	0 %	0 %	26 %	74 %
Tiroir	39 %	89 %	100 %	100 %	0 %
Sackman	79 %	100 %	100 %	100 %	0 %

Les résultats les plus proches de ceux de la méthode accélérométrique sont ceux de la méthode Sackman.

On peut donc affirmer que, sur le modèle de structure considéré (modèle 3 D) et pour le signal sismique retenu (accélérogramme San Fernando), la méthode de transfert de spectres Sackman s'est avérée la meilleure.

TABLEAU COMPARATIF
=====

n° noeud	dir. spectre	1° PIC										2° PIC									
		ACC.		SACKMAN		TIROIR		PETERS		BIGGS		ACC.		SACKMAN		TIROIR		PETERS		BIGGS	
		fréquence	intensité	fréquence	intensité	fréquence	intensité	fréquence	intensité	fréquence	intensité	fréquence	intensité	fréquence	intensité	fréquence	intensité	fréquence	intensité	fréquence	intensité
9	X	3,0	0,80	3,0	0,81	3,0	0,86	3,0	0,81	3,0	<u>1,18</u>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	Y	3,0	0,80	3,0	0,82	3,0	0,86	3,0	0,82	3,0	<u>1,17</u>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	Z	3,0	0,53	3,0	0,54	3,0	0,57	3,0	0,54	3,0	<u>1,18</u>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
36	X	3,0	0,85	3,0	0,87	3,0	0,92	3,0	0,87	3,0	<u>1,20</u>	9,5	0,60	9,0	0,65	9,0	0,53	9,5	<u>1,34</u>	7,5	<u>0,83</u>
	Y	3,0	0,89	3,0	0,90	3,0	0,95	3,0	0,90	3,0	<u>1,22</u>	6,0	0,67	6,5	0,65	6,0	0,71	6,0	<u>1,39</u>	6,5	<u>0,73</u>
	Z	3,0	0,55	3,0	0,55	3,0	0,58	3,0	0,55	3,0	<u>1,20</u>	9,5	0,40	9,0	0,32	9,5	<u>0,21</u>	9,5	<u>0,68</u>	7,5	<u>0,83</u>
39	X	3,0	0,84	3,0	0,87	3,0	0,92	3,0	0,87	3,0	<u>1,21</u>	9,5	0,58	9,0	0,62	9,0	0,51	9,5	<u>1,46</u>	7,5	<u>0,85</u>
	Y	3,0	0,91	3,0	0,92	3,0	0,97	3,0	0,92	3,0	<u>1,22</u>	6,0	0,76	6,5	0,76	6,5	0,81	6,0	<u>1,64</u>	6,5	<u>0,77</u>
	Z	3,0	0,53	3,0	0,55	3,0	0,58	3,0	0,55	3,0	<u>1,18</u>	/	/	/	/	/	9,5	0,35	/	/	/
42	X	3,0	0,84	3,0	0,87	3,0	0,91	3,0	0,87	3,0	<u>1,21</u>	9,5	0,57	9,0	0,61	9,0	0,49	9,5	<u>1,40</u>	7,5	<u>0,83</u>
	Y	3,0	0,89	3,0	0,91	3,0	0,95	3,0	0,91	3,0	<u>1,22</u>	6,0	0,69	6,5	0,67	6,0	0,73	6,0	<u>1,44</u>	6,5	<u>0,76</u>
	Z	3,0	0,51	3,0	0,55	3,0	0,58	3,0	0,55	3,0	<u>1,23</u>	7,0	0,40	6,5	0,34	/	/	7,0	<u>0,61</u>	7,5	<u>0,67</u>
47	X	3,0	0,87	3,0	0,89	3,0	0,94	3,0	0,89	3,0	<u>1,22</u>	10,0	0,84	9,0	0,93	9,0	0,71	9,5	<u>2,35</u>	7,5	<u>0,93</u>
	Y	3,0	0,95	3,0	0,97	3,0	1,02	3,0	0,97	3,0	<u>1,23</u>	6,0	0,95	6,5	1,01	6,5	1,06	6,0	<u>2,18</u>	6,5	<u>0,94</u>
	Z	3,0	0,59	3,0	0,55	3,0	0,59	3,0	0,55	3,0	<u>1,23</u>	6,0	0,42	6,5	0,40	6,5	0,35	7,0	<u>0,78</u>	7,5	<u>0,66</u>
56	X	3,0	0,86	3,0	0,89	3,0	0,94	3,0	0,89	3,0	<u>1,22</u>	10,0	0,82	9,0	0,91	9,0	0,69	9,5	<u>2,30</u>	7,5	<u>0,97</u>
	Y	3,0	0,95	3,0	0,97	3,0	1,02	3,0	0,97	3,0	<u>1,27</u>	6,0	0,98	6,5	1,06	6,5	1,11	6,0	<u>2,28</u>	5,0	<u>1,06</u>
	Z	3,0	0,51	3,0	0,55	3,0	0,59	3,0	0,55	3,0	<u>1,26</u>	7,0	0,57	6,5	0,46	6,5	<u>0,40</u>	7,0	<u>0,95</u>	5,0	<u>1,01</u>
69	X	3,0	0,89	3,0	0,92	3,0	0,98	3,0	0,92	3,0	<u>1,23</u>	10,0	1,13	9,0	1,26	9,0	0,92	9,5	<u>3,27</u>	9,5	<u>1,24</u>
	Y	3,0	1,04	3,0	1,05	3,0	1,12	3,0	1,05	3,0	<u>1,28</u>	6,5	1,45	6,5	1,60	6,5	1,61	7,0	<u>3,61</u>	6,5	<u>1,35</u>
	Z	3,0	0,53	3,0	0,55	3,0	0,59	3,0	0,55	3,0	<u>1,18</u>	/	/	/	/	/	10,0	0,38	/	/	/
86	X	3,0	0,90	3,0	0,94	3,0	1,01	3,0	0,94	3,0	<u>1,23</u>	10,0	1,37	9,0	1,49	9,0	<u>1,08</u>	9,5	<u>3,91</u>	9,5	<u>1,49</u>
	Y	3,0	1,11	3,0	1,12	3,0	1,20	3,0	1,12	3,0	<u>1,25</u>	6,5	1,92	6,5	2,12	6,5	2,08	7,0	<u>5,0</u>	6,5	<u>1,77</u>
	Z	3,0	0,50	3,0	0,56	3,0	<u>0,61</u>	3,0	0,56	3,0	<u>1,22</u>	7,0	0,65	6,5	0,53	6,5	<u>0,49</u>	7,0	<u>1,16</u>	7,5	<u>0,83</u>

NOTES : - sont soulignées les valeurs supérieures de + de 100 % aux valeurs de référence (valeurs accélérométrique)
- sont soulignées par des tirets les valeurs éloignées de + ou - 20 % des valeurs de référence
- les niveaux des pics et les accélérations de plancher sont en nombre de g

4. EVOLUTION DE L'ETAT DE L'ART DEPUIS 1983

Sackman et Kelly, dans [4], ont été les premiers à aborder rationnellement le problème des équipements en résonance ou en quasi-résonance et à établir le rôle du rapport des masses équipement/structure.

Dans [5], Der Kiureghian, Sackman et Nour-Omid évaluent la réponse d'un équipement à un signal stochastique à partir des perturbations apportées aux fréquences et modes propres de la structure du fait de la résonance ou quasi-résonance de l'équipement.

Dans [6], Igusa et Der Kiureghian développent la méthode des perturbations avec l'introduction des "amortissements non classiques" des "fréquences et modes complexes" et proposent une réponse à un signal stochastique.

Dans [7], Gupta étudie des algorithmes permettant d'évaluer les fréquences et modes du couplage structure-equipement à partir des éléments de chaque système découplé et applique sa méthode de calcul de la réponse d'un équipement en combinant des résultats obtenus dans [4] et [5] -

Signalons enfin [8], qui propose une méthode dérivée de celle décrite dans [3], mais améliorée par l'introduction de probabilités de dépassements de seuils (théorie du signal).

On constate donc que la recherche dans le domaine du transfert de spectre reste active et on peut supposer que nombre d'autres méthodes seront encore proposées.

5. DIFFICULTES SPECIFIQUES ET CONCLUSION

Indépendamment du choix de la méthode de transfert, la qualité des spectres de plancher est liée, entre autres, au type de modélisation de la structure et à la façon de prendre en compte l'ensemble des réponses modales.

L'étude d'un équipement ne peut se satisfaire d'un modèle qui ignore les résonances locales, donc qui risque de sous-estimer fortement le niveau d'accélération du support ; pour cette raison, il nous semble préférable, malgré le surcoût que cela entraîne, d'adopter une modélisation dite "3 D". Certains palliatifs, comme l'assimilation, dans un modèle dit "poutre", des planchers à des poutres rigides, sont discutables.

Pour ce qui est de la combinaison des réponses modales, combinaison que doit opérer toute méthode de transfert, le type le plus couramment utilisé est celui du cumul quadratique. Or il est admis qu'un tel cumul quadratique devient erroné lorsque des fréquences propres de structure sont proches ; certains auteurs, Gupta dans [7] en particulier, introduisent des coefficients de corrélation qui tiennent compte de la proximité des modes de structure.

L'étude comparative que nous avons menée en 1983 et qui fait l'objet de la présente communication, complétée par d'autres sur certains ateliers de l'usine de La Hague, nous a permis d'adopter une méthode de transfert de spectre.

Compte tenu de l'évolution intervenue dans ce domaine depuis, il serait souhaitable que de nouveaux tests impliquant les récents travaux des chercheurs puissent être entrepris.

REFERENCES

- [1] J.M. BIGGS et J.M. ROESSET "Seismic analysis of equipment mounted on a massive structure" - Seismic Design for Nuclear Power Plant - R.J. HENSEN - MIT Press, Cambridge, Mass. 1970 -
- [2] K.A. PETERS, D. SCHMITZ et U. WAGNER "Determination of floor response spectra on the basis of the response spectrum method" - Nuclear Engineering and Design 44 (1977) -
- [3] M. LIVOLANT et F. JEANPIERRE "Methodes usuelles d'analyse sismique des Centrales - Obtention directe des spectres de plancher - Application à une centrale à neutrons rapides et une centrale à eau pressurisée" - Réunion de spécialistes sur la conception antisismique des installations nucléaires - Paris 1-3/12/1975 - CEA - Conf 3438 -
- [4] J.L. SACKMAN et J.M. KELLY "Equipment response spectra for nuclear power plants" - Nuclear Engineering and Design 57 (1980) -
- [5] A. DER KIUREGHIAN, J.L. SACKMAN et B. NOUR-OMID "Dynamic analysis of light equipment in structures : Response to stochastic input" - Journal of Engineering Mechanics 109 (février 1983) -
- [6] T. IGUSA et A. DER KIUREGHIAN "Dynamic analysis of multiply tuned arbitrarily supported secondary systems" Report n° UCB/EERC-83/07 - University of California, Berkeley (juillet 1983) -
- [7] A.K. GUPTA "Seismic response of multiply connected MDOF primary and MDOF secondary systems" - Nuclear Engineering and Design 81 (1984) -
- [8] M. LIVOLANT, F. GANTANBEIN et R.J. GIBERT "Méthode statistique pour l'estimation de la réponse des structures au séisme" - Mécanique Matériaux Electricité n° 394-395 - Oct/Nov. 1982 -.