

N° d'ordre : 03/2009-M/G.C

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
« HOUARI BOUMEDIENE »
FACULTE DE GENIE CIVIL



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

EN : **GENIE CIVIL**

Spécialité : **CONSTRUCTION**

Par : **OUALI Nabil**

Sujet

**Effets des Dispositifs D'amortissement sur les Déplacements,
Vitesses et Accélérations des Structures**

Soutenu le 18/01/2009, devant le jury composé de :

Mr CHABAAT. M	Professeur, FGC/USTHB	Président
Mr BOUKHALED. A	Maître de Conférences, FGC/USTHB	Directeur de thèse
Mr BENYAHIA A	Professeur, FGM/USTHB	Examineur
Mr ZERZOUR. A	Maître de Conférences, ENTP	Examineur
Mr DJAKAB. E	Maître de Conférences, FGC/. USTHB	Examineur

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour mener à terme ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadreur monsieur A. BOUKHALED, Maître de conférences à l'USTHB et mon co encadreur monsieur F. CHALAH, Chargé de recherches à l'USTHB, pour avoir dirigé ce travail et qui, malgré les multiples obligations, n'ont jamais ménagé aucun effort pour suivre de près cette étude.

Je tiens à remercier Monsieur M. CHABAAT, Professeur à l'USTHB, mon enseignant et président de jury, qui m'a fait le grand honneur de présider le jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur BENYAHIA. A, Professeur à l'USTHB qui a accepté d'examiner mon travail.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur A. ZERZOUR, Directeur de ENTP, qui me fait l'honneur d'examiner mon travail, qu'il trouve ici, l'expression de ma considération distinguée.

Mes remerciements sont destinés également à Monsieur DJAKAB. E, Chargé de cours à l'USTHB qui a accepté d'examiner mon travail.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

باعتبار الجزائر دولة تقع في منطقة ذات زلزالية عالية حيث يوجد الشمال الجزائري ما بين سطحين, الأول السطح الإفريقي والثاني السطح الأوروآسيوي فيجب علينا أن نفكر جليًا في كيفية حماية العمارات والمنشآت القاعدية من هذه الكارثة الطبيعية وبالتالي فاستعمال تقنيات جديدة مضادة للزلازل هو أمر مفروض علينا لحماية الأرواح والممتلكات.

من بين هذه التقنيات تقنية العزل الزلزالي والمخمدات بحيث يسمح العزل الزلزالي بتكبير الدور وبالتالي إعطاء مرونة كبيرة للمبنى سواء كان جسر أو عمارة وهذه المرونة تؤثر مباشرة في الطاقة الزلزالية الممتصة حيث تقوم بخفض مستواها, لكن هذه التقنية إلا وهي العزل الزلزالي لها بعض السلبيات ومن بينها التحرك الكبير للمبنى ولتفادي هذا التحرك يجب استعمال المخمدات وهو هدف هذا العمل في إطار مقدمة في البحث العلمي.

Résumé :

L'Algérie, par sa situation géographique, est un pays de grande sismicité du fait qu'elle est située entre deux plaques tectoniques, la plaque Africaine et la plaque Euro-Asiatique. Pour cela, on doit élaborer une méthode de protection de structures contre les catastrophes. L'utilisation de nouvelles techniques parasismiques devient donc une nécessité pour la protection des vies humaines et de sauvegarder les biens matériels.

Parmi ces techniques, on trouve la technique d'isolation sismique et celle des amortisseurs. La première permet d'augmenter la période et la souplesse de la structure. Cette souplesse influe directement sur l'énergie sismique absorbée. Cependant, l'inconvénient majeur que présente cette technique est le déplacement important de la structure. Pour réduire ces effets néfastes, l'une des solutions efficaces est celle d'incorporer dans la structure des dispositifs d'amortissement. Ceci constitue l'objet principal de cette étude.

Mot clés ; Amortisseur, amortissement, isolation sismique

Abstract:

Based on the geographical situation, Algeria is categorized as a high seismic activity zone. Algeria is located between two tectonic plates; The African Plate and the Eurasian Plate. The African Plate which includes the continent of Africa, as well oceanic crust lies between the continent and various surrounding ocean ridges. The African Plate's speed is estimated at around 2.5cm per year. When structures are build in a high seismic activity zones, structural engineers have to elaborate:

- 1- Safety provisions suitable for use throughout the specific region;
- 2- Design and building practices that address the earthquake hazard and minimize the resulting damage.

Among these practices, we can find the seismic isolation. The seismic isolation is a technology that protects the structure from the destructive effects of an earthquake. The seismic isolation decouples the structure from the ground and provides it with dampening. Seismic isolation is physically achieved by placing the structure on isolators. The isolators are laterally flexible elements, yet they are able to carry the vertical loads on the structure. Since the isolators are more flexible than the structure, most of the lateral movements occur in the isolators. As result, the isolated structure experiences less motion and reduced forces. One of the disadvantages of these systems is the relatively high permanent displacements. In order to soften this effect, isolators can be coupled with special shock absorbers, to form a dual system meeting the resistance and service requirements.

The aim of the thesis presented by the author is to bring some clarification related to these systems.

Notations

ΔU : Energie dissipée par cycle,

ζ : Valeur d'amortissement

A : Amplitude de mouvement.

c : Constante d'amortissement visqueux,

Ω : Fréquence de la force d'excitation.

A_{1} : Amplitude initiale

A_{n+1} : Amplitude après n cycles.

Ω_r : Fréquence de résonance

δ : Décroissance logarithmique équivalente

Q : Largeur de bande

ΔE : Energie transformée en chaleur ou énergie de contrainte interne

E : Energie de déformation à l'amplitude maximale.

σ : Contrainte

ε : Déformation

ϕ : Angle de phase

ξ_{eq} : Valeur d'amortissement équivalente

ξ_i : Valeur d'amortissement du matériaux i

E_i : **Energie** élastique de déformation emmagasinée dans chacun des matériaux

F_m : Force d'inertie.

F_c : Force d'amortissement due à la structure.

F_m : Force de rigidité.

$P(t)$: Charge dynamique (variable en fonction du temps).

M : Matrice de la masse de la structure

C : Matrice d'amortissement

K : Matrice de rigidité

\ddot{U} : Accélération du système

\dot{U} : Vitesse du système

U : Déplacement du système

V : Vitesse du piston (soupape)

C et **α** : paramètres dépendants de la loi de comportement du fluide
F^c : Force de l'amortisseur ajouté au système
 \ddot{U}_g : Accélération sismique du sol
 α, β : Paramètres employés par la méthode d'intégration de NEWMARK.
T : Période propre de la structure
d : Déplacement élastique
Sa (T, ζ) : Accélération du spectre élastique du règlement
 ρ : Coefficient de réduction
 ξ_{nl} : Amortissement dû à l'amortisseur
 $\xi_{visqueux}$: Amortissement visqueux de la structure
h(α) : Fonction de linéarisation
F : Force maximale de l'amortisseur

Liste des tableaux

Tableau I.1 : *classement de l'amortissement.*

Tableau I.2 : *définition de l'amortissement.*

Tableau I.3 : *mesure de l'amortissement - Bibliothèque Millikan*

Tableau I.4 : *valeurs caractéristiques d'amortissement (en pourcentage)*

Tableau III.1 : *différents types d'amortisseurs selon les différentes valeurs de l'exposant α*

Tableau IV.1 : *valeur du déplacement maximal*

Tableau IV.2 : *valeur du déplacement maximal*

Tableau IV.3 : *valeur du déplacement maximal*

Tableau IV.4 : *récapitulatif des valeurs du déplacement maximal*

Tableau V.1 : *tableau récapitulatif du model 1 (portique sans amortisseur)*

Tableau V.2 : *tableau récapitulatif du model 1 (portique avec amortisseur)*

Tableau V.3 : *tableau récapitulatif de comparaison entre portique avec ou sans amortisseur*

Tableau V.4 : *tableau récapitulatif du model pont sans amortisseur*

Tableau V.5 : *tableau récapitulatif du model pont avec amortisseur*

Tableau V.6 : *tableau récapitulatif du model pont avec appareils d'appuis glissants et un amortisseur du model pont avec amortisseur*

Tableau V.7 : *tableau récapitulatif de comparaison entre pont avec ou sans amortisseur*

Liste des figures

- Figure I.1 :** *Différents types d'amortissement.*
- Figure I.2** *Réponses libres de vibration*
- Figure I.3** *Spectre de réponse en fréquence.*
- Figure I.4.** *Diagramme de contrainte–déformation sous chargement cyclique.*
- Figure I.5 :** *Vibrations harmoniques forcées de la bibliothèque de Millikan*
- Figure I.6 :** *Réponse sismique de la bibliothèque Millikan*
- Figure I.4 :** *Systèmes à amortissement contrasté*
- Figure I.8 :** *Amortissement de Rayleigh*
- Figure I.9 :** *Amortissement de Caughey*
- Figure II.1 :** *Appui en caoutchouc fretté*
- Figure II.2 :** *Appui en pendule glissant*
- Figure II.3 :** *Appuis à déformation et à glissement*
- Figure II.4 :** *Appui à billes*
- Figure II.5 :** *Caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb*
- Figure II.6** *Coupe transversale d'un amortisseur type visqueux à liquide*
- Figure II.7** *Illustration des contreventements par amortisseur visqueux d'un bâtiment*
- Figure II.8** *Utilisation des amortisseurs dans les bâtiments*
- Figure II.9** *Système de contreventement en acier avec amortisseurs visqueux*
- Figure II.10 :** *Coupe transversale d'un amortisseur visqueux*
- Figure II.11 :** *Montage d'amortisseurs visqueux en superstructure*
- Figure II.12** *Système d'amortisseurs actifs*
- Figure II.13** *Utilisation des amortisseurs*
- Figure II.14** *Amortisseurs dans les ponts*
- Figure II.15:** *Amortisseur à frottement*
- Figure II.16:** *Comportement d'un ressort élastique*
- Figure II.17:** *Comportement d'un fusible*
- Figure II.18 :** *Comportement d'un amortisseur visqueux*
- Figure II.19 :** *Comportement d'un fusible/ amortisseur élastoplastique*
- Figure III.1 :** *Lois de comportements de différents types d'amortisseurs*
- Figure IV.1** *Oscillateur simple*

-
- Figure V.1** : *Modèle portique sans amortisseur*
- Figure V.2** : *Modèle portique avec amortisseur*
- Figure V.3** : *Modèle pont en élévation*
- Figure V.4** : *Section transversale du pont*
- Figure V.5** : *Pont courant avec appareils d'appuis néoprène*
- Figure V.6** : *Pont courant avec appareils d'appuis néoprène en service*
- Figure V.7** : *Pont courant avec appareils d'appuis néoprène en séisme*
- Figure V.8** : *Période*
- Figure V.9** : *Spectre de réponse*
- Figure V.10** : *Déformation de la pile*
- Figure V.11** : *Pont avec appareils d'appuis glissants*
- Figure V.12** : *Pont avec appareils d'appuis glissants en service*
- Figure V.13** : *Pont avec appareils d'appuis glissants sous séisme*
- Figure V.14** : *Période*
- Figure V.15** : *Spectre de réponse*
- Figure V.16** : *Pont avec appareils d'appuis glissants et des amortisseurs*
- Figure V.17** : *Pont avec appareils d'appuis glissants et des amortisseurs en service*
- Figure V.18** : *Pont avec appareils d'appuis glissants et des amortisseurs sous séisme*
- Figure V.19** : *Période*
- Figure V.20** : *Spectre de réponse*
- Figure V.21** : *Spectre de réponse de comparaison*
- Figure V.22** : *L'utilité des organes parasismique pour un bâtiment*
- Figure V.23** : *Fenêtre d'introduction des données*
- Figure V.24** : *Fenêtre des résultats*
- Figure V.25** : *Fichier résultat, relatif au : calcul des paramètres de l'amortisseur*

Liste des graphes

- Graphe IV.1 :** *Signal séismique d' El- centro*
- Graphe IV.2 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=1$ et $\xi=0\%$*
- Graphe IV.3 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=1$ et $\xi=5\%$*
- Graphe IV.4 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=1$ et $\xi=10\%$*
- Graphe IV.5 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=1$ et $\xi=20\%$*
- Graphe IV.6 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=1$ et $\xi=50\%$*
- Graphe IV.7 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=1$ et $\xi=100\%$*
- Graphe IV.8 :** *Comparaison des déplacements de différentes valeurs de ξ avec $\omega=1$*
- Graphe IV.9 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=5$ et $\xi=0\%$*
- Graphe IV.10 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=5$ et $\xi=5\%$*
- Graphe IV.11 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=5$ et $\xi=10\%$*
- Graphe IV.12 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=5$ et $\xi=20\%$*
- Graphe IV.13 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=5$ et $\xi=50\%$*
- Graphe IV.14 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=5$ et $\xi=100\%$*
- Graphe IV.15 :** *Comparaison des déplacements de différentes valeurs de ξ avec $\omega=5$*
- Graphe IV.16 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=10$ et $\xi=0\%$*
- Graphe IV.17 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=10$ et $\xi=5\%$*
- Graphe IV.18 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=10$ et $\xi=10\%$*
- Graphe IV.19 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=10$ et $\xi=20\%$*
- Graphe IV.20 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=10$ et $\xi=50\%$*
- Graphe IV.21 :** *Variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=10$ et $\xi=100\%$*
- Graphe IV.22 :** *Comparaison des déplacements en fonction de ξ avec $\omega=5$*
- Graphe V.1 :** *Déplacement du portique sans amortisseur*
- Graphe V.2 :** *Vitesse du portique sans amortisseur*
- Graphe V.3 :** *Accélération du portique sans amortisseur*
- Graphe V.4 :** *Déplacement du portique avec amortisseur*
- Graphe V.5 :** *Vitesse du portique avec amortisseur*
- Graphe V.6 :** *Accélération du portique avec amortisseur*
- Graphe V.7 :** *Comparaison des déplacements entre portique avec et sans amortisseur*

-
- Graphe V.8 :** *Comparaison des vitesses entre portique avec et sans amortisseur*
- Graphe V.9 :** *Comparaison des accélérations entre portique avec et sans amortisseur*
- Graphe V.10 :** *Déplacement du pont sans amortisseur*
- Graphe V.11:** *Vitesse du pont sans amortisseur*
- Graphe V.12 :** *Accélération du pont sans amortisseur*
- Graphe V.13 :** *Déplacement du pont avec amortisseur*
- Graphe V.14:** *Vitesse du pont avec amortisseur*
- Graphe V.15 :** *Accélération du pont avec amortisseur*
- Graphe V.16 :** *Comparaison des déplacements entre pont avec et sans amortisseur*
- Graphe V.17 :** *Comparaison des vitesses entre pont avec et sans amortisseur*
- Graphe V.18 :** *Comparaison des accélérations entre pont avec et sans amortisseur*
- Graphe V.19 :** *Déplacement du pont avec appareils d'appuis glissants et un amortisseur*
- Graphe V.20 :** *Vitesse du pont avec appareils d'appuis glissants et un amortisseur*
- Graphe V.21 :** *Vitesse du pont avec appareils d'appuis glissants et un amortisseur*

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Amortissement, théories et concepts	
I.1. Introduction	4
I.2. Définition de l'amortissement	4
I.3. Classification de l'amortissement.....	5
I.3.1. la position de l'amortissement.....	5
I.3.2. Nature de l'amortissement	5
a- L'amortissement matériel.....	5
b- L'amortissement de système.....	6
c- L'amortissement de rayonnement.....	6
I.3.3. Aspect physique.....	7
A. Amortissement visqueux	7
B. Amortissement de Coulomb	7
C. Amortissement par hystérésis.....	8
I.4. Mesure de l'amortissement	9
I.4.1. Méthode de courbe d'affaiblissement	9
I.4.2. Méthode de largeur de bande.....	10
I.4.3. Méthode de l'énergie	11
I.4.4. Méthode de déphasage	12
I.5. Mesure de l'amortissement modal	13
I.5.1. Principe de l'amortissement modal	13
I.5.2. Valeurs caractéristiques de l'amortissement	15
I.6. Amortissement non classique	15
I.7. Construction de la matrice d'amortissement	17
I.7.1. Amortissement de Rayleigh	17
I.7.2. Amortissement de Caughey.....	18
I.7.3. Matrice d'amortissement modal	19

Chapitre II : Identification et typage des organes et dispositifs parasismiques

II.1.Introduction	22
II.2.Les appuis parasismiques	22
II.2.1.Appuis à déformation.....	23
II.2.2.Appuis à glissement	24
II.2.3.Appuis à déformation et à glissement	25
II.2.4.Appuis à roulement	25
II.3.Le choix entre ces types.....	26
II.4. Dispositifs d'amortissement	26
II.5.Addition des amortisseurs parasismiques aux structures	27
II.6.Types d'amortisseurs parasismiques	27
II.6.1.Amortisseurs hystérétiques	27
II.6.2.Amortisseurs visqueux	28
II.6.3 Amortisseur à frottement	32
II.7. Conditions d'addition des amortisseurs aux constructions	33
II.8. Différents appareils disponibles permettent d'obtenir les relations force-déplacement	34
II.8.1. Ressort élastique.....	34
II.8.2. Fusible.....	35
II.8.3. Amortisseur visqueux	35
II.8.4. Fusible/amortisseur élasto-plastique	36
II.8.5. Coupleur dynamique	36

Chapitre III : Formulation du problème d'amortissement et méthode de dimensionnement des amortisseurs

III.1. Introduction	37
III.2. Caractéristiques des amortisseurs visqueux	37
III.3. Formulation des amortisseurs dans l'équation du mouvement	38
III.4. Méthode de dimensionnement des amortisseurs visqueux non linéaire a partir d'un spectre de réponse	44

Chapitre IV : Application numérique sur un oscillateur simple

IV.1. Introduction	51
IV.2. Formulation mathématique du problème.....	51
IV.3. Application	52

Chapitre V : Application (pont et portique) et développement d'un logiciel de dimensionnement des amortisseurs

V.1. Introduction	62
V.3. Exemples étudiés	63
V.3.1. Cas d'un portique	63
V.3.1.1. Portique sans amortisseur	63
V.3.1.2. Portique avec amortisseur	66
V.3.1.3. Comparaison des valeurs du déplacement, vitesse et accélération entre portique sans et avec amortisseur	68
V.3.2. Cas d'un pont	70
V.3.2. 1. Pont sans amortisseurs.....	71
V.3.2. 2. Pont avec amortisseurs.....	74
V.3.2.3. Comparaison.....	76
V.3.2.4. pont avec amortisseurs et appareils d'appuis glissants sur les culées et la pile	77
V.3.3. Interprétation	80
V.4. Exemple de conception	81
V.4. 1.Cas d'un pont	81
V.4. 1.Cas d'un bâtiment	88
V.5. Dimensionnement d'amortisseurs visqueux non linéaires pour les ouvrages de génie civil	89
Conclusion générale.....	96

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

I. Introduction générale

Les tremblements de terre les plus récents, survenus dans le monde et en particulier en Algérie ont causé la mort de milliers de personnes et de graves dommages matériels. L'exemple qui reste gravé dans notre mémoire est le dernier séisme qui a touché les régions de Boumerdes et d'Alger (Séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003). Pour l'ensemble des acteurs participant à l'acte de construire, le séisme est l'épreuve de vérité pour une construction. L'objectif que l'on se fixe est de contribuer à la mise en œuvre d'une démarche réfléchie dans la protection parasismique des structures.

Pour un grand nombre d'ingénieurs, l'approche la plus conventionnelle de protection des ouvrages (bâtiments et ponts) des effets des tremblements de terre consiste à augmenter leur rigidité. Cette approche n'est pas toujours efficace surtout quand il s'agit d'un contexte qui favorise le phénomène de résonance et d'amplification des forces sismiques.

Par conséquent, le domaine du génie parasismique a connu des percées importantes catalysées entre autres par le développement des techniques de calcul sur support informatique et l'utilisation des installations d'essais puissantes. Ceci a favorisé l'émergence de plusieurs technologies innovatrices telles que l'introduction des dispositifs spéciaux d'isolation entre l'infrastructure et la superstructure. Cette approche, communément connue sous le nom " isolation sismique " permet d'absorber les efforts importants sans que la structure ne soit endommagée et ainsi assurant la protection des vies humaines et des biens matériels [14].

En outre, les déplacements imposés à la construction par les secousses du sol se localisent principalement au niveau des appuis. Grâce à ces déplacements, la période propre de la construction s'allonge et les charges sismiques sont réduites. Il y a donc une atténuation du mouvement sismique [4].

De même, ce mécanisme d'isolation de la base peut être utilisé en association avec des amortisseurs parasismiques dans le but de contrôler la déformation du système d'isolation et le déplacement absolu de la superstructure située au dessus de l'interface d'isolation. D'autre part, on peut utiliser seulement ces amortisseurs parasismiques pour atténuer les amplitudes d'oscillations et par conséquent réduire les charges sismiques. L'utilisation des dispositifs d'amortissement représente une solution efficace pour la réhabilitation des structures existantes. Compte tenu de tous ces moyens de réduction d'accélération considérés comme passifs, de nombreuses recherches ont été menées durant plusieurs années pour mettre au point un système de maîtrise actif de la réponse des bâtiments aux séismes [3].

En effet, au cours des vingt dernières années, ces technologies innovatrices de dissipation d'énergie et d'appuis parasismiques ont été développées et proposées pour améliorer la performance sismique des bâtiments. Certains de ces appuis parasismiques ont déjà été utilisés tandis que d'autres sont restés au stade d'études théoriques ou d'essais. Par la suite, cette technique des appuis parasismiques, avec plusieurs variantes, a suscité par le passé et actuellement, un intérêt pour la plupart des pays concernés par le risque sismique. Par conséquent, une attention considérable est accordée à cette technologie principalement au Japon et aux États-Unis, qui ont introduit l'installation de ces systèmes non seulement dans les nouveaux bâtiments mais aussi pour la réhabilitation des bâtiments existants.

En outre, des séismes ont déjà frappés des structures de constructions récentes, tels que les séismes dévastateurs de Northridge (Californie, 1994) et de Kobe (Japon, 1995). On a constaté que les structures isolées sismiquement se sont très bien comportées [13]. A cet effet, la réalisation d'ouvrages avec des systèmes d'isolation sismique suscite un intérêt certain pour les pays sujets à l'activité sismique. En l'Algérie, ces dispositifs sont en cours d'utilisation par des entreprises étrangères dans les autoroutes et dans un bâtiment en cours de réalisation. Notons aussi la rédaction en cours du 'Règlement Parasismique des Ouvrages d'Art' (RPOA).

Notre travail consiste à faire dans un premier temps, un bilan bibliographique portant aussi bien sur les plans théorique et conceptuel de l'amortissement et d'appareils d'amortissement. Nous procédons dans un deuxième temps à des applications concrètes pour montrer l'intérêt de l'incorporation de ces appareils aux structures (portique et pont). Cet intérêt est mis en évidence par la réduction des grandeurs tels le déplacement, la vitesse et l'accélération de ces structures supposées soumises à un signal sismique.

Le mémoire est subdivisé en cinq chapitres :

Le premier chapitre a pour but de présenter les concepts et les théories de l'amortissement,

Le deuxième chapitre porte sur l'identification et typage des organes et dispositifs parasismiques,

Le troisième chapitre présente les étapes et les formules nécessaires à la résolution du problème de l'amortissement,

Le quatrième chapitre porte sur une application numérique programmée en fortran consistant à mettre en évidence l'importance de l'amortissement,

Le cinquième chapitre présente une application numérique réalisée par un programme informatique pour montrer la pertinence des structures avec des amortisseurs comparativement à des structures sans amortisseur ainsi de développer un logiciel du dimensionnement des amortisseurs visqueux nommé *DAV 2007 v.1.0*.

Ce modeste travail se termine par une conclusion générale portant sur les résultats obtenus et certaines recommandations concernant l'utilisation et le dimensionnement des amortisseurs.

Chapitre I : Amortissement, théories et concepts

Amortissement, théories et concepts

I.1. Introduction

La notion d'amortissement constitue un sujet très important dans les études de structures soumises à des excitations dynamiques. Mais, elle a besoin d'être maîtrisée pour être incorporée efficacement dans l'analyse des structures. Il existe relativement peu de littérature traitant le sujet dans la profondeur qu'il mérite.

L'amortissement est un paramètre important dans l'analyse des structures sous chargement dynamique. Un ensemble de valeurs des coefficients d'amortissement issu d'une base expérimentale est proposé pour mener une analyse structurale selon le type de matériaux.

Le but de ce chapitre est de définir l'amortissement et d'en discuter les bases conceptuelles et théoriques.

I.2. Définition de l'amortissement

La consultation du dictionnaire Larousse donne les définitions suivantes de l'amortissement :

Amortissement n. m. diminution d'amplitude d'un mouvement ondulatoire. (Prélèvement annuel sur les bénéfices d'une entreprise pour compenser la diminution de valeur subie par les immobilisations du fait de leur vétusté) : *amortissement industriel*. (Extinction graduelle d'une dette) : *amortissement financière*.

Quelques synonymes de l'amortissement ;

amortissement : adoucissement, affaiblissement, apaisement, assourdissement, atténuation, extinction, rendement, travail, utilisation.

Des définitions par domaine sont données dans le tableau ci-après :

Tableau I.2 : différentes définitions pour l'amortissement.

Domaine	Définition
- électricité	Diminution progressive dans le temps de certaines grandeurs caractéristiques d'un phénomène
- géologie	Diminution progressive de l'amplitude d'un déplacement tectonique au sein des terrains voisins.
- physique	Terme qui caractérise la rapidité de l'extinction graduelle d'une vibration. Affaiblissement progressif des mouvements vibratoires sonores dans un corps, par suite de la dissipation de l'énergie.

L'amortissement définit les propriétés de dissipation d'énergie d'un matériel ou d'un système sous un effort cyclique, pour notre cas dynamique. L'amortissement dans une structure vibrante est associé à la dissipation de l'énergie mécanique, habituellement par conversion en une énergie thermique. La dissipation d'énergie est égale au travail effectué par la force d'amortissement. Ainsi, l'amortissement est fondamentalement la dissipation de l'énergie qui se produit dans les systèmes vibrants [1].

I.3. Classification de l'amortissement

L'amortissement peut être identifié et caractérisé par trois paramètres qui sont directement liées à son environnement, à savoir sa localisation, sa nature matériels et son aspect physique.

I.3.1. la position de l'amortissement

La position de l'amortissement est le lieu où se produit l'amortissement ; ceci nous permet de distinguer deux types, amortissement interne qui se produit à l'intérieur du système et l'amortissement externe qui se produit aux limites du système (interface).

I.3.2. Nature de l'amortissement

La nature de l'amortissement est généralement décrite comme suit:

- Amortissement matériel ;
- Amortissement de système ;
- Amortissement de rayonnement.

a- Amortissement matériel

L'amortissement matériel est l'énergie absorbée dans les matériaux de construction. Il est dû à l'hystérésis interne des matériaux résultant du comportement non linéaire des contraintes-déformation, du frottement inter granulaire et de la thermo élasticité. Celui-ci, existe généralement pour la plupart des aciers de construction et de béton armé, cependant l'amortissement pour certains matériaux comme le bois de construction stratifié peut être important.

b- Amortissement de système

L'amortissement de système est l'énergie absorbée au niveau des discontinuités structurales, par exemple les raccords boulonnés ou rivetés et les joints de construction des structures en béton armé. Ceci résulte du frottement dans le glissement ou le rongement des joints, des appuis, du revêtement ou des diverses autres parties de la structure pendant le mouvement relatif. Il est également connu sous le nom d'amortissement de discontinuité. On considère que l'amortissement matériel peut être prévu et mesuré par des essais, alors qu'il est beaucoup plus difficile de prévoir le niveau de l'amortissement de système où le degré peut changer considérablement même pour les structures qui sont identiques.

c- Amortissement de rayonnement

L'amortissement de rayonnement est l'énergie absorbée par l'environnement de la structure, par exemple la résistance de l'air, de l'eau et des fondations qui sont difficilement prévisibles. La dissipation de l'énergie dans les fondations se produit même lorsque le matériel de fondation est linéairement élastique en raison de la propagation des ondes d'effort par la fondation [1].

L'organigramme suivant résume les différents types d'amortissements (figure I.1).

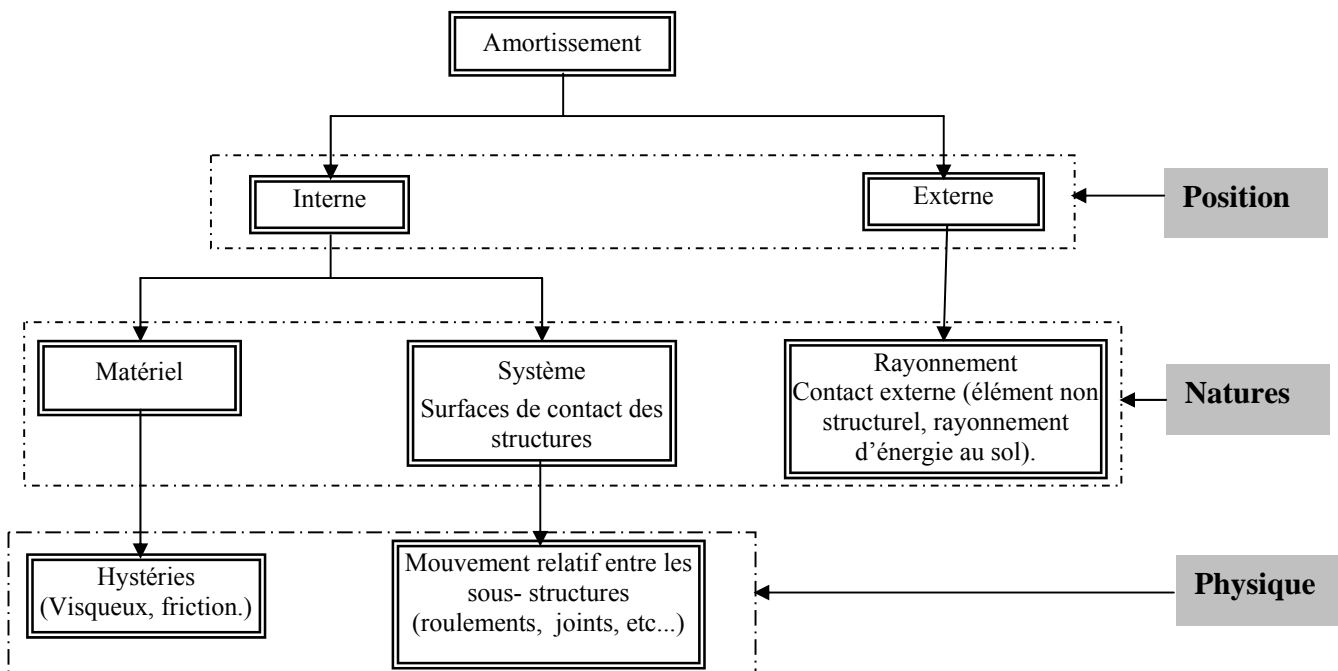


Figure I.1 : classification de l'amortissement.

I.3.3. Aspect physique

L'amortissement, comme décrit précédemment, est représenté par trois familles (pas nécessairement et spécifiquement liées à une méthode particulière de dissipation d'énergie):

- Amortissement visqueux.
- Amortissement de Coulomb.
- Amortissement par hystérésis.

On doit noter que ceci correspond à une représentation modérée n'impliquant pas un mécanisme pour l'amortissement [1].

A. Amortissement visqueux

Les forces d'amortissement dans l'analyse dynamique des structures sont supposées habituellement proportionnelles à l'amplitude de la vitesse et opposées à la direction du mouvement. Ce type d'amortissement est connu en tant qu'amortissement visqueux. Il est analogue à l'amortissement produit par le mouvement des fluides.

Bien que l'amortissement de type visqueux peut être exprimé de manière mathématique simple, d'autres types d'amortissement plus complexes sont souvent exprimés en tant qu'amortissement visqueux équivalent en analyse. L'analogie avec l'amortissement visqueux est souvent faite indépendamment des caractéristiques dispersives réelles du système. En fait, il est admis que si la nature brute de la dissipation est expliquée, les détails réels sont non pertinents pour des calculs de technologie. C'est-à-dire, le concept de prise en compte d'amortissement visqueux équivalent est mitigé [1].

B. Amortissement de Coulomb

L'amortissement de Coulomb ou amortissement de friction peut être considéré comme existant quand la force d'amortissement est constante (dépendant seulement de la réaction normale) et s'oppose au mouvement du corps en mouvement.

L'amortissement des structures réelles n'est pas strictement dû à la viscosité mais dans la plupart du temps est provoqué par le frottement aux interfaces comme dans les assemblages boulonnés, dans les joints du revêtement et dans les fissures du béton armé. Ces forces de friction sont indépendantes de l'amplitude et de la fréquence, elles s'opposent toujours au mouvement et leur grandeur, à une première approximation, peut être considérée constante.

Les expériences prouvent que les vibrations des structures réelles se trouvent habituellement entre les réponses visqueuses et de friction. Cependant, la prétention visqueuse est commode pour l'employer analytiquement et est suffisamment précise pour la plupart des objectifs [1].

C. Amortissement par hystérésis

Les expériences sur l'amortissement qui se produit dans les matériaux solides des structures qui ont été soumises à une contrainte cyclique ont montré que la force d'amortissement peut être indépendante de la fréquence de la force d'excitation. Afin de modéliser cet amortissement interne ou matériel, la limite de l'amortissement par hystérésis de a été définie telle que :

$$\Delta U = \pi \zeta A^2 \quad (\text{I.1})$$

Cette définition de l'amortissement par hystérésis s'avère justement coïncider avec celle de l'amortissement structural comme indiqué par Clough et Penzien (1975) pour l'excitation d'état d'équilibre.

Clough et Penzien (1975) définissent l'amortissement structural pour un système à un seul degré de liberté en tant que tel, tant que la force d'amortissement est proportionnelle au déplacement et s'oppose au mouvement. Sous toute condition autre que celle de l'excitation d'état d'équilibre, cette définition est quelque peu douteuse. Néanmoins, à l'état d'équilibre, elle donne le même résultat que l'amortissement par hystérésis comme dans l'équation. (I.1).

L'amortissement par hystérésis est le résultat du frottement entre les plans internes qui glissent les uns sur les autres pendant la déformation du corps. L'énergie absorbée dans cette déformation est dissipée sous forme de chaleur [1].

L'origine principale de l'amortissement est toujours le frottement par exemple l'oscillation d'un pendule s'atténue progressivement après un certain nombre de cycles à cause des frottements entre l'air le pendule et le frottement de la rotule.

I.4. Mesure de l'amortissement

Comme discuté précédemment, il y a plusieurs manières de définir mathématiquement la capacité d'amortissement matériel et/ou de structure. Dans une situation donnée le procédé utilisé dépendra principalement de la méthode de mesure adoptée.

La mesure de l'amortissement dans le béton a toujours posé des difficultés parce que le béton est un matériau hétérogène avec un amortissement relativement bas. Les procédures expérimentales ont généralement favorisé l'essai par des méthodes résonnantes et en particulier l'affaiblissement d'un système libre vibrant. Il y a une variété de techniques qui sont généralement utilisées pour mesurer la capacité d'amortissement [1].

I.4.1. Méthode de courbe d'affaiblissement ' courbe d'atténuation'

Elle est connue comme étant la méthode d'affaiblissement libre. Elle compte parmi les méthodes directes. L'amortissement est obtenu en mesurant la diminution de l'amplitude de vibrations libres (voir figure I,2) et puis en calculant la décroissance logarithmique δ [1].

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \ln \left[\frac{A_1}{A_{n+1}} \right] \quad (I.2)$$

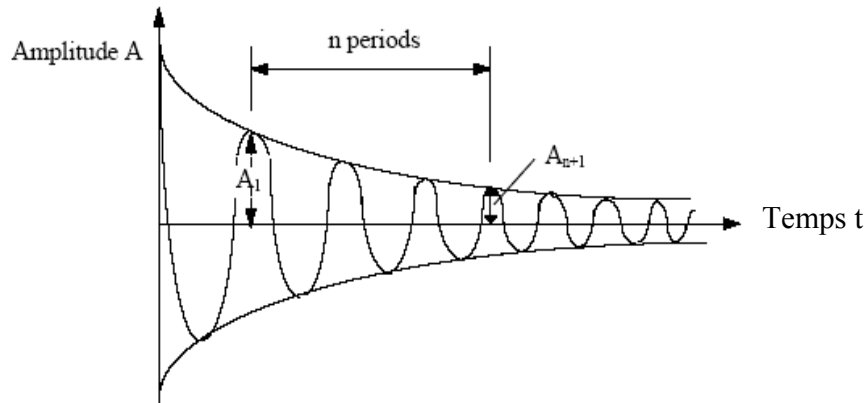


Figure I.2 Réponses libres de vibration.

Les structures sont excitées par un marteau pour des vibrations libres, et les réponses sont enregistrées à un ou plusieurs points par des accéléromètres. (Figure I.2)

I.4.2. Méthode de largeur de bande

Pour un amortisseur idéal et pour de petites valeurs d'amortissement la constante d'amortissement peut être obtenue par la différence entre les valeurs Ω_2 et Ω_1 de la courbe de résonance due à une fonction harmonique (voir figure I.3).

Selon la réponse du spécimen autour de sa fréquence de résonance (Cole, 1965), la "largeur de bande" est dénotée par Q, où :

$$\frac{1}{Q} = \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{\sqrt{3}\Omega_r} \quad (I.3)$$

Dans laquelle Ω_r est la fréquence de résonance et Ω_1 et Ω_2 sont les fréquences se trouvant respectivement à gauche et à droite, leur amplitude est égale à la moitié de la fréquence de la résonance (voir figure I.3).

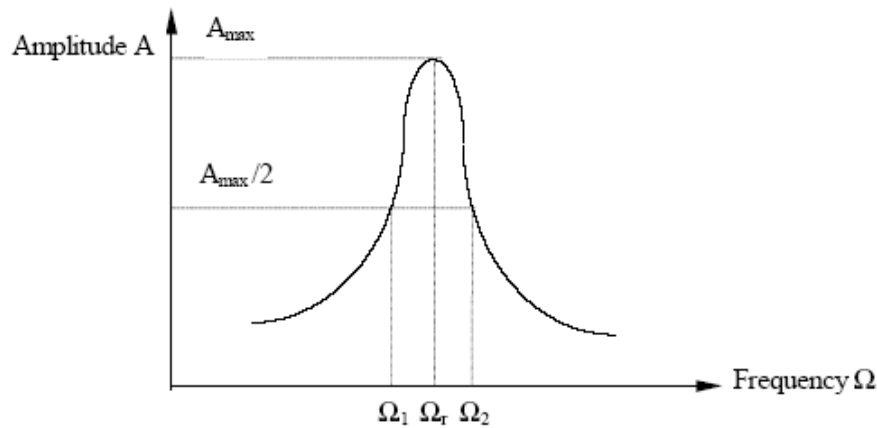


Figure I.3 *spectre de réponse en fréquence.*

Au lieu d'utiliser la courbe d'amplitude de déplacement, la vitesse ou les courbes d'amplitude d'accélération peuvent être également employées dans les cas où l'amortissement est faible. Pour des valeurs relativement petites de la capacité d'amortissement, la décroissance logarithmique équivalente δ peut être obtenue à partir de l'expression:

$$Q = \frac{\pi}{\delta} \quad (\text{I.4})$$

Dans la plupart des cas pratiques l'amortissement est évalué par la méthode de la courbe d'affaiblissement (comme discuté dans la section précédente) plutôt que par la méthode de la largeur de bande [1].

1.4.3. Méthode de l'énergie

L'amortissement peut être également mesuré au moyen de la capacité d'amortissement spécifique S définie comme étant le rapport de l'énergie de déformation perdue par cycle à toute l'énergie de déformation du modèle pour ce cycle :

$$S = \frac{\Delta E}{E} \quad (\text{I.5})$$

ΔE : est l'énergie qui est transformée en chaleur ou énergie de contrainte interne et E est l'énergie de déformation à l'amplitude maximale. La valeur de S peut être déterminée directement en

mesurant le secteur de la boucle d'hystérésis du diagramme de contrainte–déformation du modèle sous le chargement cyclique, comme indiqué sur la figure 2.4. De nouveau, selon Cole et Spooner (1968), pour de petites valeurs de l'amortissement, le décrément logarithmique, δ , est obtenu par [1]. :

$$\delta = \frac{S}{2} \quad (\text{I.6})$$

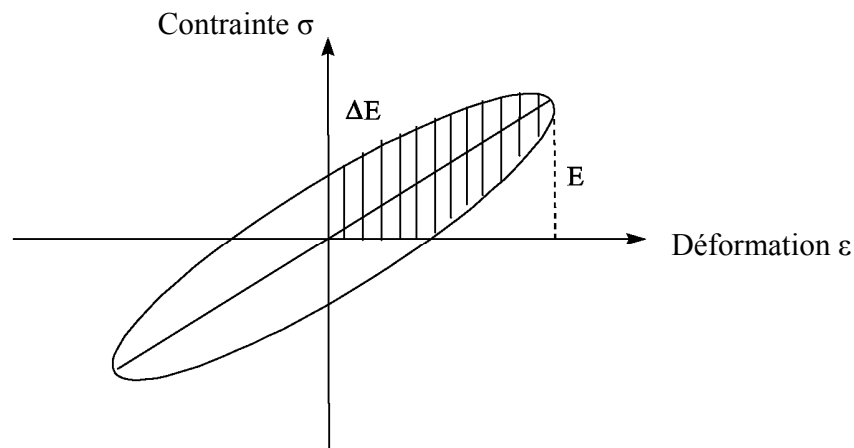


Figure I.4. Diagramme de contrainte–déformation sous chargement cyclique.

1.4.4. Méthode de déphasage

Dans le cas de fonctions de forces oscillatoires, la contrainte (ou les forces internes) est trouvée pour mener la déformation (ou le déplacement). L'angle de phase ϕ qui représente le retard de la contrainte derrière l'effort appliqué dans les oscillations forcées d'un spécimen, peut être employé pour évaluer la capacité d'amortissement.

Selon Cole et Spooner (1968), la décroissance logarithmique, δ , peut être liée à cet angle de phase ϕ comme indiqué par l'expression suivante [1].:

$$\delta = \pi \tan \phi \quad (\text{I.7})$$

I.5. Mesure de l'amortissement modal

I.5.1. Principe de l'amortissement modal

La bibliothèque Millikan, sur le campus de l'université de Caltech (Californie), fournit un exemple de mesures de l'amortissement sur une structure réelle.

Cet ouvrage a été sollicité à l'aide de vibreurs harmoniques convenablement disposés sur sa hauteur pour exciter son mode fondamental. Par ailleurs, on dispose sur le même ouvrage d'enregistrements accélérométriques recueillis lors des deux séismes l'ayant sollicité : séisme de Lytle Creek de magnitude 5.4 sur l'échelle de Richter et d'accélération maximale au sol égale à 0.05g et séisme de San Fernando de magnitude 6.4 sur l'échelle de Richter et d'accélération maximale au sol égale à 0.20g. La figure I.5 présente, pour l'excitation par vibreur, la réponse en accélération au sommet de l'immeuble en fonction de la fréquence d'excitation des vibreurs. L'enregistrement fait clairement apparaître un pic marqué à la fréquence de 1.49 Hz correspondant à la fréquence du mode fondamental.

Pour le mode fondamental de vibration, la structure répond comme un oscillateur à un seul degré de liberté. Une méthode d'identification inverse permet donc de déterminer le pourcentage d'amortissement critique reproduisant au mieux la courbe de la figure I.5 La valeur obtenue est donnée dans le tableau I.3.

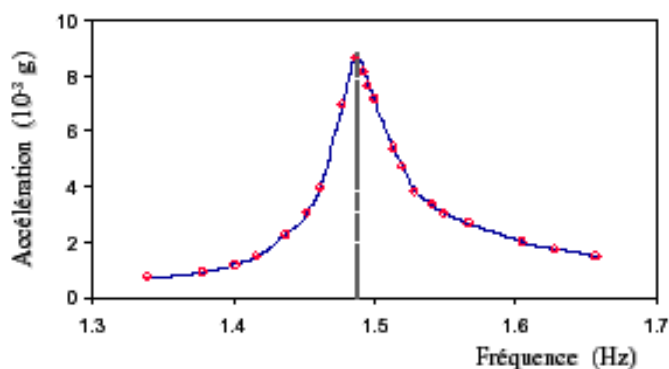


Figure I.5 : Vibrations harmoniques forcées de la bibliothèque de Millikan

La figure I.6 représente pour le séisme de San Fernando les accélérations enregistrées à la base et au sommet de l'ouvrage à partir desquelles le déplacement différentiel sur la hauteur peut être calculé (figure I.5). En reproduisant des résultats analogues à plusieurs niveaux, il est

possible d'identifier les deux premiers modes de vibration de l'ouvrage et de calculer le pourcentage d'amortissement critique associé à chacun de ces modes. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau I.3

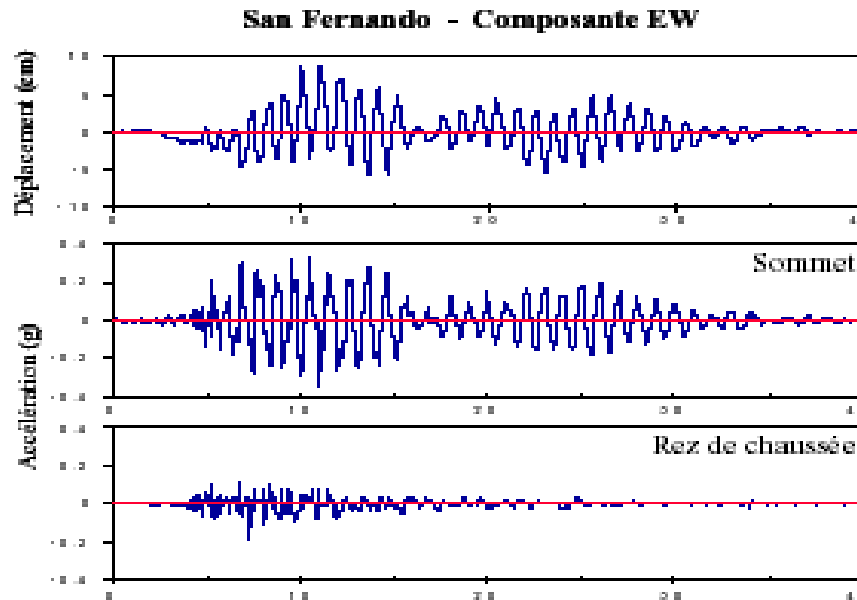


Figure I.6 : Réponse sismique de la bibliothèque Millikan

Le tableau I.3 fait apparaître des résultats importants, qui ont une portée plus générale que ceux relatifs à cet ouvrage. La période du mode fondamental croît lorsque l'amplitude de la sollicitation augmente depuis l'excitation par vibreur jusqu'au séisme le plus fort. Corrélativement l'amortissement du mode fondamental croît de 1% à 7%. On constate également que l'amortissement modal n'est pas constant et peut être plus élevé ou plus faible sur le deuxième mode que sur le premier. Ces mesures confirment en particulier que l'amortissement dépend de l'amplitude de la déformation [2].

Tableau I.3 : Amortissement mesurés- Bibliothèque Millikan

Excitation	Accélération (g)	Mode fondamental		Seconde mode	
		Période (s)	Amortissement (%)	Période (s)	Amortissement (%)
Générateur Vibrations	3.10^{-3} à 17.10^{-3}	0.66 – 0.68	0.7-1.5	-	-
Lytle Creek	0.035	0.71	2.2	0.18	3.6
San Fernando	0.348	0.98	7.0	0.20	5.9

I.5.2. Valeurs caractéristiques d'amortissement

Hormis des cas exceptionnels comme celui de la bibliothèque Millikan, on ne dispose pas de mesures de l'amortissement sur l'ouvrage à étudier. L'analyste doit s'en remettre à son propre jugement ou à des valeurs conventionnelles publiées par voie réglementaire. Ces valeurs sont généralement rattachées à un type de matériau (béton, acier, bois, etc...). Le tableau I.4 présente un tel ensemble de valeurs dans lequel une distinction a été introduite en fonction du niveau de sollicitation atteint dans l'ouvrage [2].

Tableau I.4 : Valeurs caractéristiques d'amortissement (en pourcentage)

Matériau	Déformation	
	< 0.5 limite élastique	Voisinage limite élastique
Béton arme	3-5	7-10
Béton précontraint	2-3	7-10
Acier soudé	2-3	5-7
Acier boulonné	5-7	10-15
Bois cloué	5-7	15-20

I.6. Amortissement non classique

Certains systèmes conduisent à des valeurs d'amortissement très contrastées entre les différentes parties de l'ouvrage. Cette situation se rencontre par exemple pour l'étude des phénomènes d'interaction sol-structure ou fluide-structure (figure I.4). Généralement les structures présentent des pourcentages d'amortissement équivalents relativement faibles, de l'ordre de quelques pourcents (tableau I.4), alors que le milieu avec lequel elles interagissent peut présenter des amortissements plus élevés (cas du sol où la valeur peut atteindre plusieurs dizaines de pourcents) ou du fluide dans lequel il est au contraire très faible (inférieur à 1 %)[2].

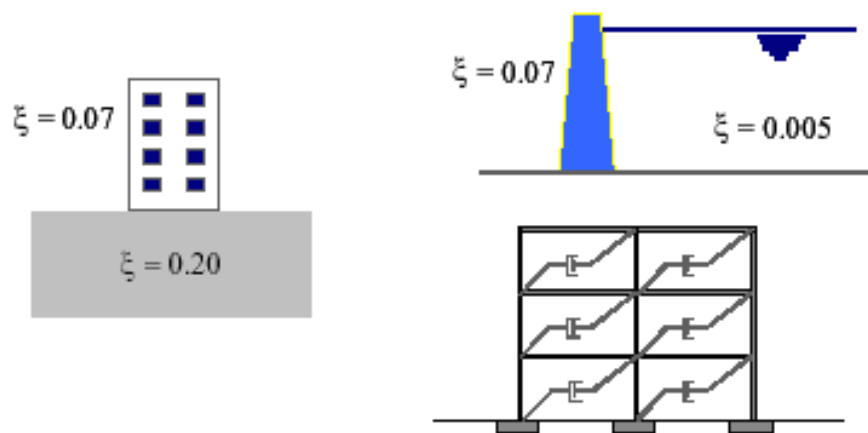


Figure I.4 : *Systèmes à amortissement contrasté*

Dans le même ordre d'idée, l'utilisation d'amortisseurs concentrés conduit également à des valeurs contrastées de l'amortissement entre les différentes parties du système. Cette technique est utilisée par exemple pour l'isolation vibratoire des machines vibrantes, la conception ou le renforcement de structures en zone sismique, l'idée étant d'accroître la dissipation d'énergie et donc de limiter la part de l'énergie transmise à l'ouvrage. Lorsqu'une structure est composée d'un assemblage de plusieurs matériaux, l'usage veut que l'amortissement modal équivalent soit calculé au prorata de l'énergie élastique de déformation E_i emmagasinée dans chacun des matériaux [2].

$$\xi_{eq} = \frac{\sum \xi_i E_i}{\sum E_i} \quad (I.8)$$

Il peut cependant être nécessaire de construire une matrice d'amortissement lorsque le recours à des calculs par intégration temporelle s'avère indispensable pour la prise en compte de systèmes partiellement non linéaires.

Plusieurs techniques sont envisageables: définir *à priori* la forme de la matrice d'amortissement, construire cette matrice à partir de la donnée de l'amortissement modal ou, lorsque cela est possible, construire la matrice d'amortissement à partir des données géométriques et mécaniques du système (amortisseurs localisés). Les deux premières approches conduisent à un amortissement qualifié d'orthogonal car la diagonalisation de la matrice d'amortissement sur la base des modes propres est préservée. La dernière approche conduit généralement à un amortissement non classique qui nécessite le recours à des techniques de résolution spécifiques pour la résolution sur la base des modes [2].

I.7. Construction de la matrice d'amortissement

I.7.1. Amortissement de Rayleigh

On se donne *à priori* la structure de la matrice d'amortissement sous la forme d'une combinaison linéaire de la matrice de masse et de la matrice de rigidité [2].

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (I.9)$$

$$M \ddot{\mathbf{U}} + C \dot{\mathbf{U}} + K \mathbf{U} = \mathbf{F}(t) \quad (I.10)$$

Il est évident que dans ce cas, la propriété d'orthogonalité de la matrice d'amortissement par rapport aux modes propres est préservée. En reportant l'équation (I.9) dans l'équation générale de la dynamique (I.10) et en faisant usage de cette propriété, l'équation du mouvement s'écrit :

$$m_j \ddot{y}_j(t) + (\alpha m_j + \beta k_j) \dot{y}_j(t) + k_j(t) y_j = p_j(t) \quad , \quad j = 1, N \quad (I.11)$$

D'où il ressort que le pourcentage d'amortissement critique équivalent s'exprime par[2] :

$$\xi_j = \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha}{\omega_j} + \beta \omega_j \right] \quad (I.12)$$

L'amortissement donné par l'équation (I.12) se compose de deux termes, l'un proportionnel à la pulsation et l'autre inversement proportionnel à celle ci. Comme en général, il

est souhaitable de représenter la dissipation d'énergie dans le système par un amortissement indépendant de la fréquence, un choix approprié des valeurs de α et β permet de satisfaire, de façon approximative, cette condition. La détermination de α et β est illustrée sur la figure I.9 pour le portique de la figure I.8 : en se fixant deux valeurs de pulsations, ω_1 et ω_2 , pour lesquelles l'amortissement donné par l'équation (I.12) prend la valeur recherchée, il s'ensuit qu'entre ω_1 et ω_2 l'amortissement est sensiblement égal, quoique légèrement inférieur, à la valeur recherchée. La première pulsation ω_1 est prise égale à celle du mode fondamental du système et la seconde ω_2 à la plus grande pulsation ayant un intérêt pour cette modélisation de l'amortissement est classiquement utilisée pour la réalisation de calculs temporels sur des systèmes comportant une partie pseudo-élastique, pour laquelle il est nécessaire de spécifier un amortissement équivalent, et une partie non linéaire dans laquelle la dissipation d'énergie est directement prise en compte par la loi de comportement du matériau.

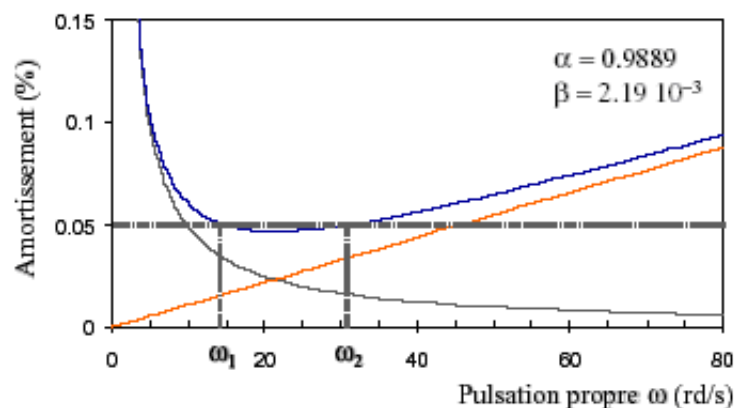


Figure I.8 : Amortissement de Rayleigh

On notera que seule la combinaison linéaire de la matrice de masse et de la matrice de rigidité permet de donner un amortissement sensiblement indépendant de la fréquence. L'utilisation d'un seul de ces termes donnerait naissance à un amortissement dépendant de la fréquence dont la réalité physique est généralement prise en défaut [2].

1.7.2. Amortissement de Caughey

Il s'agit d'une généralisation de l'amortissement de Rayleigh dans laquelle la matrice d'amortissement s'exprime comme une combinaison linéaire de p termes constitués du produit de la matrice de masse et de l'inverse de la matrice de rigidité [2].

$$\underline{C} = \underline{M} \sum_{b=0}^p a_b [\underline{M}^{-1} \underline{K}]^b \quad (\text{I.13})$$

En procédant comme pour l'amortissement de Rayleigh, on montre que le pourcentage d'amortissement critique du mode j s'exprime par :

$$\xi_j = \frac{1}{2} \sum_{b=0}^p a_b \omega_j^{2b-1} \quad (\text{I.14})$$

Ainsi en choisissant p égale à $N-1$, où N est le nombre de modes, il est théoriquement possible de respecter la valeur de l'amortissement modal pour chacun des modes du système. Dans la pratique en retenant un nombre de termes nettement inférieur, $p \leq N-1$, on obtient une approximation suffisante. La figure I.9 illustre l'application de la formulation (I.13) au cas du portique de la figure I.8, avec dans ce cas p égal à $N-1$ [2].

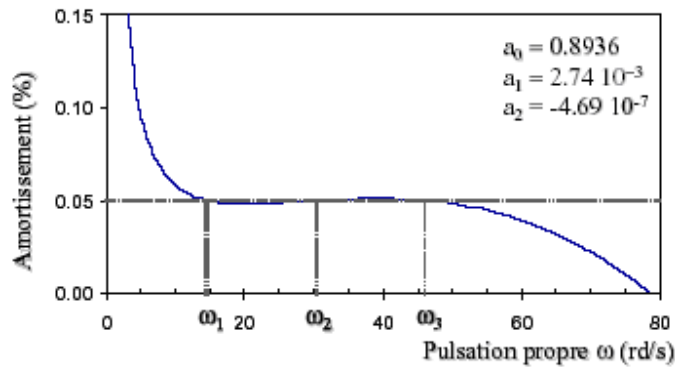


Figure I.9 : Amortissement de Caughey

I.7.3. Matrice d'amortissement modal

Il est également possible à partir de la donnée des amortissements modaux de construire directement la matrice d'amortissement associée. Soit \underline{C} cette matrice et \underline{F} la matrice d'ordre N constituée des N vecteurs modaux [2] :

$$\underline{\Phi} = [\underline{D}_1 \quad \underline{D}_2 \quad \dots \quad \underline{D}_j \quad \dots \quad \underline{D}_N] \quad (\text{I.15})$$

La matrice \underline{C} doit satisfaire la relation :

$$\underline{\Phi}^T \underline{C} \underline{\Phi} = \underline{\Xi} \quad (\text{I.16})$$

Dans laquelle la matrice $\underline{\Xi}$ a la structure suivante :

$$\Xi = \begin{bmatrix} c_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & c_j & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & c_N \end{bmatrix} \quad (\text{I.17})$$

Avec des coefficients égaux à :

$$c_j = 2m_j \omega_j \xi_j \quad (\text{I.18})$$

L'inversion de la relation (I.16) fournit l'expression de la matrice C :

$$C = [\Phi^T]^{-1} \Xi \Phi^{-1} \quad (\text{I.19})$$

Le calcul de C par la relation (I.19) nécessite l'inversion de deux matrices d'ordre N n'est pas efficace d'un point de vue numérique. Tenant compte de la relation d'orthogonalité de l'expression I.20 , dans laquelle la matrice \mathbf{m} est diagonale avec des coefficients égaux aux masses généralisées $j m$, on en déduit en prenant l'inverse de la relation (I.20) et en pré-multipliant ou post-multipliant par les quantités MF et TM F , les relations I .21 et I.22

$$\Phi^T M \Phi = m \quad (\text{I.20})$$

$$\underline{\Phi}^{-1} = \underline{\mathbf{m}}^{-1} \underline{\Phi}^T \underline{\mathbf{M}} \quad (\text{I.21})$$

$$[\underline{\Phi}^T]^{-1} = \underline{\mathbf{M}} \underline{\Phi} \underline{\mathbf{m}}^{-1} \quad (\text{I.22})$$

En reportant les relations (I.21) et (I.22) dans la relation (I.19), il vient :

$$\underline{\mathbf{C}} = [\underline{\mathbf{M}} \underline{\Phi} \underline{\mathbf{m}}^{-1}] \underline{\Xi} [\underline{\mathbf{m}}^{-1} \underline{\Phi}^T \underline{\mathbf{M}}] \quad (\text{I.23})$$

Les matrices \mathbf{m} et \mathbf{E} étant diagonales (equ I.16 et I.20) le produit $\mathbf{m}^{-1} \mathbf{E} \mathbf{m}$ est immédiat ; c'est une matrice diagonale \mathbf{k} dont les termes valent :

$$\kappa_{jj} = \frac{2\xi_j \omega_j}{m_j} \quad (\text{I.24})$$

La matrice C s'exprime alors comme le simple produit de matrices :

$$\underline{\mathbf{C}} = \underline{\mathbf{M}} \underline{\Phi} \underline{\kappa} \underline{\Phi}^T \underline{\mathbf{M}} \quad (\text{I.25})$$

En notant symboliquement $\mathbf{G} = \mathbf{A} \mathbf{x} \mathbf{B}$ la matrice carrée dont les termes g_{k1} sont les produits $a_k b_1$ des composantes des deux vecteurs A et B la relation (I.25) peut alors se développer sous la forme :

$$\underline{\mathbf{C}} = \underline{\mathbf{M}} \left[\sum_{j=1}^N \frac{2\xi_j \omega_j}{m_j} \underline{\mathbf{D}}_j \otimes \underline{\mathbf{D}}_j^T \right] \underline{\mathbf{M}} \quad (\text{I.26})$$

Sous cette forme, le $j^{\text{ème}}$ terme de la somme apparaît comme la contribution du $j^{\text{ème}}$ mode, d'amortissement ζ_j , à la matrice d'amortissement globale. Si ce terme est nul, alors le mode j ne contribue pas à l'amortissement global du système [2].

Chapitre II : Identification et typage des organes et dispositifs parasismiques

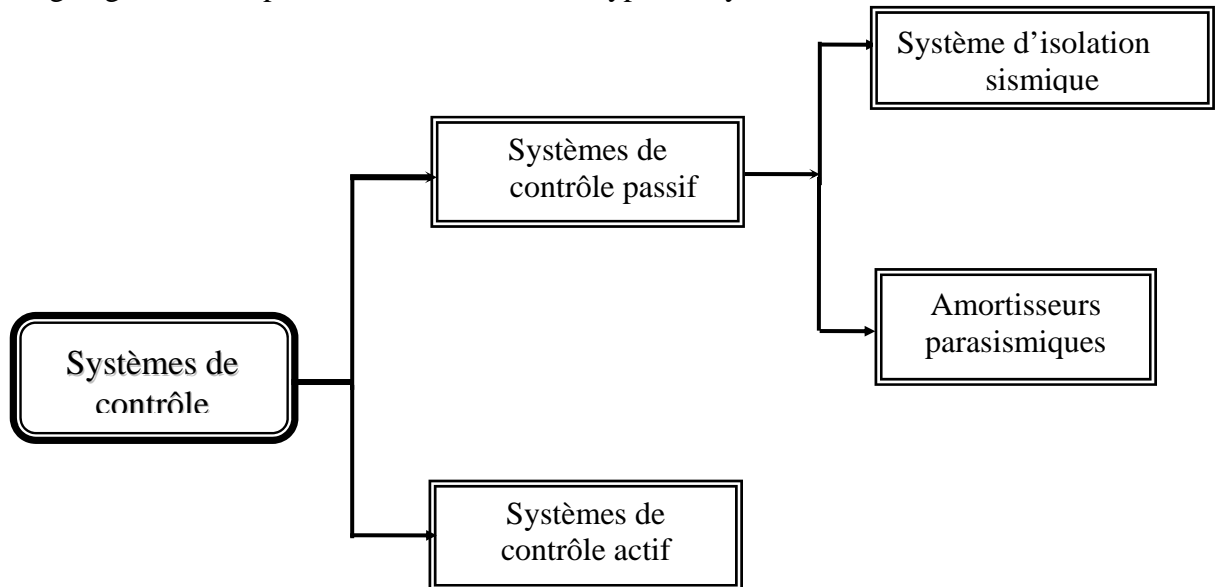
Identification et typage des organes et dispositifs parasismiques

II.1.Introduction

Pour atténuer les effets dynamiques (sismiques) nous pouvons agir par l'adoption d'un système de contrôle actif ou passif.

Le système de contrôle passif se compose de deux types de procédés : procédé par l'isolation sismique, procédé par l'amortissement.

L'organigramme ci après résume les différents types de systèmes de contrôle de structures :



Système de contrôle de structures

L'utilisation des organes parasismiques dans les structures de génie civil notamment dans les ponts pour réduire l'effort sismique devient de plus en plus une nécessité afin de construire des structures qui résistent aux séismes violents.

On peut adopter une conception optimale en employant des appareils spéciaux qui permettant de changer le schéma statique, afin de mieux répartir les efforts entre les appuis et de les réduire globalement.

Cette réduction d'efforts peut s'effectuer de deux manières différentes :

- Soit on conserve au pont un comportement sensiblement élastique linéaire et on adapte la rigidité des appuis ou l'amortissement, seuls paramètres qui, avec la masse, conditionnent la réponse dynamique. Les efforts maximums dans les piles et les déplacements du tablier sont alors pratiquement proportionnels à l'accélération du sol.
- Soit on confère au pont un comportement élastoplastique en limitant les forces horizontales transmises par les piles au tablier. Les efforts dans les piles sont alors peu dépendants du niveau sismique contrairement aux déplacements.

Pour réaliser ces objectifs, on dispose de plusieurs solutions qui sont généralement fondées sur l'utilisation des appareils d'appuis (spéciaux ou parasismique) ou des amortisseurs bien adopté au contexte du projet.

Ce chapitre sera consacré à l'identification, le fonctionnement et le domaine d'utilisation des différents organes parasismiques et dispositifs d'amortissement.

II.2. Organes parasismiques

Les organes parasismiques sont des dispositifs caractérisés par une grande souplesse horizontale et une rigidité verticale, ils sont placés entre l'infrastructure et la superstructure pour dissiper le maximum d'énergie.

Il existe plusieurs types d'organes parasismiques. Certains ont été déjà utilisés, d'autres sont restés au stade d'études théoriques ou d'essais. Parmi ces plusieurs catégories et selon leur mode de fonctionnement, on peut citer [14]:

II.2.1.Appuis à déformation

Les appuis à déformation, utilisés pour isoler les constructions sont analogues aux appuis couramment utilisés pour les ponts et ont toujours montré un comportement satisfaisant. Ils sont en général constitués d'un empilement de feuillets d'élastomère naturel (caoutchouc) ou synthétique (Néoprène) séparés par des frettes métalliques.

La présence des frettes confère aux appuis une grande rigidité verticale alors que les feuillets d'élastomère peuvent se déformer facilement en cisaillement horizontal, permettant aussi d'obtenir une grande souplesse vis-à-vis des efforts horizontaux agissant sur le bâtiment et autorisent des déplacements notables de la superstructure.

Par conséquent, ces appuis en élastomère fretté fournissent une solution efficace et simple à mettre en œuvre pour la protection parasismique des bâtiments. Ils permettent une réduction sensible des sollicitations sismiques subies par les structures.

On distingue différents types d'appuis à déformation, tels que les appuis en caoutchouc fretté (figure II.1), les appuis en néoprène fretté et les appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb.

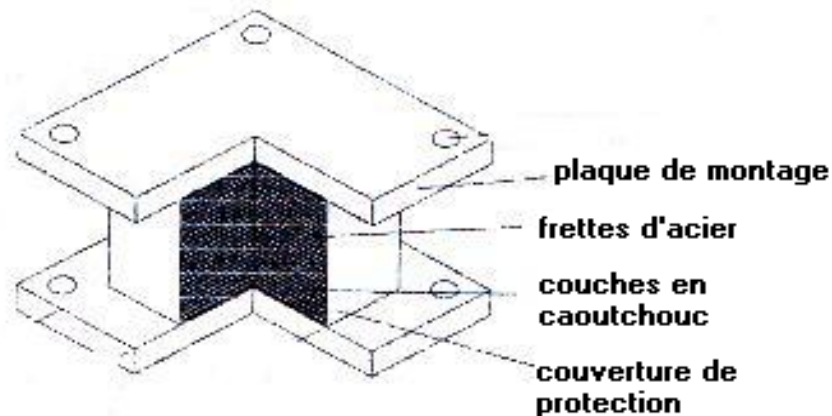


Figure II.1 : Appui en caoutchouc fretté

II.2.2.Appuis à glissement

Le système d'appuis à glissement est constitué d'une part de plaques solidaires de la superstructure et d'autre part, de plaques fixées aux fondations. Leur interface constitue le plan de glissement.

Ces systèmes permettent le découplage des mouvements horizontaux et verticaux de la superstructure de ceux des éléments de fondations qui est dû à la différence importante des fréquences d'oscillation dans les deux directions. La réponse à l'excitation sismique d'une structure reposant sur des plaques de glissement ne dépend que de sa masse et du coefficient de frottement entre les plaques.

Parmi ces appuis, on peut citer les appuis en pendules glissants qui utilisent une interface de glissement sous forme de cuvette (portion d'une sphère) qui confère à la structure un mouvement global similaire à un pendule (figure II.2).

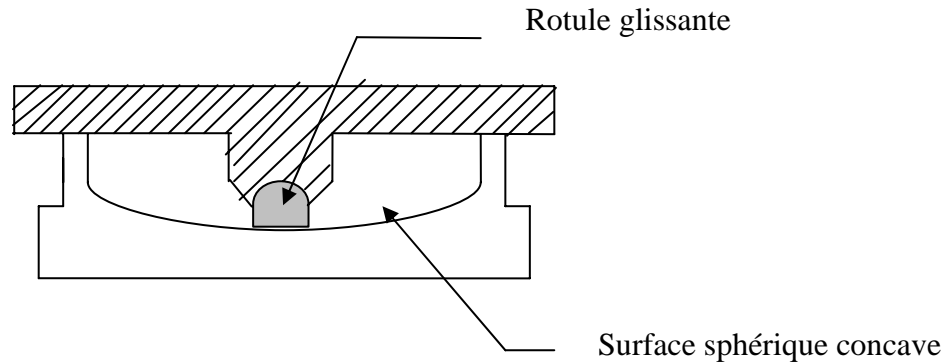


Figure II.2 : *Appui en pendule glissant*

II.2.3.*Appuis à déformation et à glissement*

Ces appuis résultent de l'association de plaques de glissement et des appuis élastomères (figure II.3). Dans un premier temps, le système se déforme latéralement grâce à la distorsion de l'élastomère. Lorsque la force nécessaire à l'accroissement de la distorsion devient supérieure à la force de frottement entre les plaques, ce qui se produit lors des séismes de très forte intensité, le glissement commence à se produire. Ce système de protection sismique est très efficace et entraîne une réduction à la fois des accélérations et des déplacements en superstructure et conduit ainsi à une diminution importante des efforts tranchants à la base.

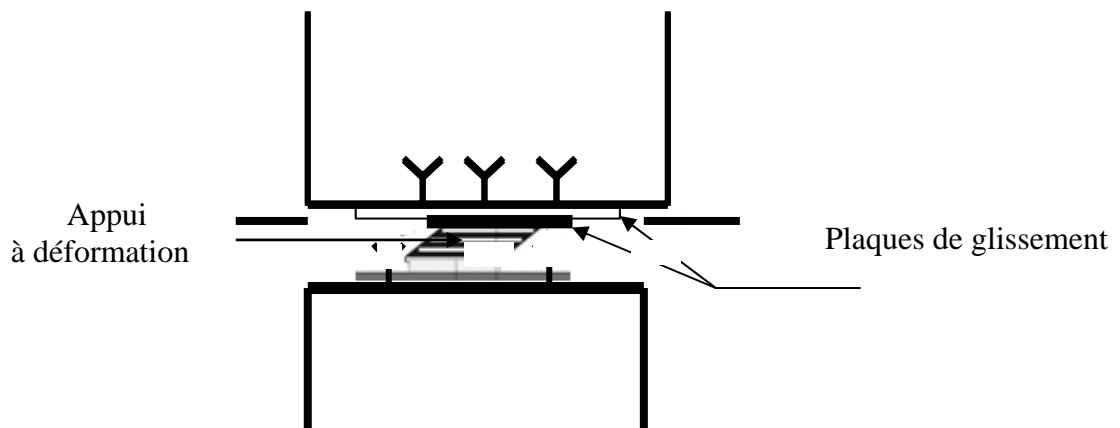


Figure II.3 : *Appuis à déformation et à glissement*

II.2.4.*Appuis à roulement*

Bien que plusieurs systèmes d'appuis à roulement aient été proposés, il n'existe que très peu de réalisations de ce type en raison des inconvénients (durée de vie limitée

maintenance difficile et coûteuse) qu'ils présentent. Pour permettre des mouvements dans les deux directions horizontales, on utilise des billes sphériques (fig. II.4) ou deux couches orthogonales de rouleaux cylindriques. Un dispositif de blocage vis-à-vis de l'action du vent ainsi que des amortisseurs parasismiques peuvent être prévus.

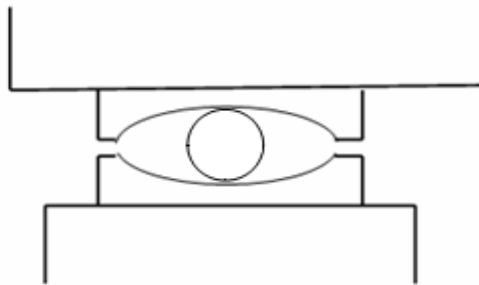


Figure II.4 : *Appui à billes*

II.3.Choix entre les types d'appuis parasismiques

Le choix de types d'appuis appropriés pour isoler la base des constructions nécessite une évaluation des caractéristiques, des normes de performance parasismique et des coûts de ces appuis parasismiques. Il est par ailleurs nécessaire de prendre en considération le rendement et l'entretien à long terme de ces appuis. Puisque le caoutchouc peut durcir ou s'étirer, il est nécessaire d'effectuer des inspections périodiques afin de s'assurer en tout temps de sa souplesse. Par contre, les appuis à glissement ne nécessitent généralement aucun entretien.

En plus, une autre considération qui régit le choix des appuis est l'état du sol. Les appuis à déformation perdent en grande partie leur efficacité dans les sols mous, à longue période d'oscillation. En effet, leurs périodes propres sont dans ce cas proches de la période d'excitation, donc proche de la résonance. Sur ces sols, les appuis à glissement conviennent mieux car pour les faibles coefficients de frottement des plaques, la réponse de la superstructure est indépendante du contenu fréquentiel du mouvement sismique. D'autre part, l'association de plaques de glissement et d'appuis à déformation supprime les inconvénients que représentent ces appuis à déformation dans les sols meubles.

Les appuis à roulement sont très peu utilisés en raison de leurs inconvénients, dont les principaux sont le grippage éventuel du système en l'absence durable de mouvement, et leur faible capacité d'amortissement.

II.4. Dispositifs d'amortissement

Les amortisseurs dynamiques sont des dispositifs utilisés pour atténuer des mouvements oscillatoires gênants, souvent dus à des phénomènes de résonance, qui peuvent apparaître dans des tours de grande hauteur (World Financial Center à Shanghai) ou dans des passerelles minces et souples (Passerelle de Solferino à Paris) ou encore dans des ponts de longue portée (Pont de Normandie). Ils peuvent être causés par les effets des vents ou des séismes, le mouvement d'une foule de piétons ou les effets du trafic sur un pont.

L'utilisation des amortisseurs dynamiques n'est pas récente, mais la nécessité de trouver une solution pour augmenter l'amortissement des structures est un problème qui se pose même à présent.

Citons par ordre chronologique certains projets déjà réalisés pour les quels ce souci d'amortisseur a été pris en compte :

1978 : Pose d'un des tous premiers amortisseurs dynamiques dans l'immeuble de la Citicorp à New-York (279m de haut).

1986 : Pose du premier amortisseur dynamique au Japon dans la Tour du Port de Chiba (125m de haut).

1992 : Apparition des premiers amortisseurs actifs, c'est-à-dire contrôlés par ordinateur pour optimiser leurs performances.

Ces systèmes ont été largement utilisés au Japon ; pays qui compte beaucoup de tours de grande hauteur, soumises à des vents forts, à de nombreux typhons et à des sollicitations d'origine sismique.

Ce sont essentiellement les Japonais qui ont développé cette technique au cours des vingt dernières années, jusqu'aux systèmes très sophistiqués utilisant actuellement des amortisseurs contrôlés par ordinateur.

II.5. Addition des amortisseurs parasismiques aux structures

Dans la technologie de la construction, l'amortissement peut être défini comme une caractéristique d'un système structurel, qui s'oppose au mouvement en tentant à ramener le système au repos.

La technique d'amélioration du comportement de la structure par l'addition des dispositifs d'amortisseurs parasismiques est semblable à celle d'un amortisseur dans un véhicule. De la même façon que l'amortisseur réduit les chocs causés par les mauvais états

des routes, ces amortisseurs parasismiques réduisent aussi l'incidence des mouvements du sol sur l'ouvrage et sur ses occupants [4].

Ces dispositifs d'amortisseurs permettent de dissiper une quantité d'énergie élevée et d'atténuer les amplitudes des oscillations sismiques. Ils convertissent l'énergie cinétique des charges externes en énergie thermique (chaleur) [3], généralement par des déformations inélastiques ou de frottement concentré dans ces dispositifs, protégeant de ce fait les autres éléments structuraux [5]. En outre, ces amortisseurs n'ont aucune fonction porteuse dans le domaine statique et peuvent être dimensionnés pour supporter une charge dynamique.

II.6. Types d'amortisseurs parasismiques

Un certain nombre de dispositifs d'amortisseurs sont actuellement en service ou proposés pour l'usage en structures conventionnelles ou en association avec des appuis parasismiques dans les structures isolées. Ils sont plus souvent hystérétiques, visqueux ou à frottement.

II.6.1. Amortisseurs hystérétiques

Les éléments dissipateurs peuvent être en acier spécial dont le rôle est d'absorber les efforts sismiques et de dissiper l'énergie par plastification alternée. Ces éléments peuvent être combinés avec un appareil d'appui classique acier-téflon destinée à transmettre uniquement les charges verticales. Il peut également s'agir d'un appareil en élastomère fretté avec un noyau cylindrique en plomb [6].

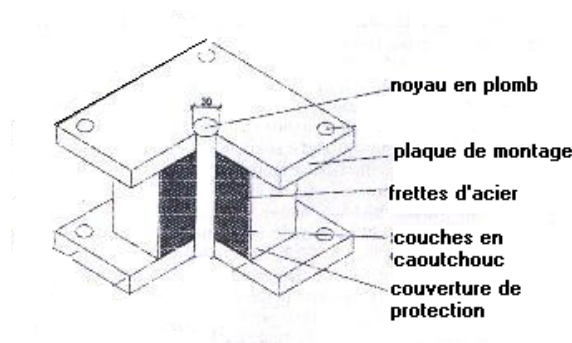


Figure II.5 : Caoutchouc fretté avec amortisseur en barre de plomb

II.6.2. Amortisseurs visqueux

En termes simples, les amortisseurs visqueux sont des tiges qui se déplacent selon un mouvement de va-et-vient dans un cylindre de liquide visqueux et qui absorbe l'énergie induite lors d'un séisme au moyen d'une friction entre la tige, le cylindre et le liquide. Les pièces communes d'un amortisseur visqueux sont une tige de piston solide en acier inoxydable imprégnée de téflon, un cylindre fermé et un liquide de travail, qui est généralement un liquide de silicone inerte placé en permanence dans une chambre étanche de l'amortisseur (Taylor et Constantinou, 2000). La figure 3 présente une illustration d'un amortisseur visqueux.

On peut fixer les amortisseurs, comme les vérins à force, à une structure au moyen d'une chape de type montage sur goujons filetés ou d'un montage de plaque de base. La figure II.6 présente un schéma d'un système de contreventement par amortisseur d'un bâtiment (Keller). Dans la figure II.8, on présente un système de contreventement avec deux amortisseurs visqueux visibles à la base du contreventement (photographie fournie par Craig Keller de Taylor Devices, N. Tonawando, New-York).

La force d'un amortisseur visqueux est fonction de la vitesse de course et peut être déphasée par des contraintes produites par le mouvement de la structure. La force de l'amortisseur diminue lorsque le déplacement de la structure est maximal (accélération nulle). On obtient le maximum de force de viscosité lorsque le déplacement de la structure est minimal ou que la structure reprend sa position initiale. La réponse en opposition de phase est une caractéristique très importante d'un amortisseur visqueux à liquide puisqu'elle aide à réduire simultanément les contraintes et la déformation d'un bâtiment.

Ces dispositifs sont des tiges qui se déplacent selon un mouvement de va-et-vient dans un cylindre rempli avec un liquide visqueux et qui absorbe l'énergie induite lors d'un séisme au moyen d'une friction entre la tige, le cylindre et le liquide

Les amortisseurs visqueux sont également très efficaces et permettent une dissipation d'énergie très significative où les diagrammes "charges-déformations" montrent une boucle d'hystérésis s'approchant d'un rectangle. La quantité maximale d'énergie que ce type d'amortisseurs peut dissiper dans un temps très court n'est limitée que par la capacité thermique du plomb et du tube en acier. En plus, ils peuvent être montés plus facilement en superstructure.

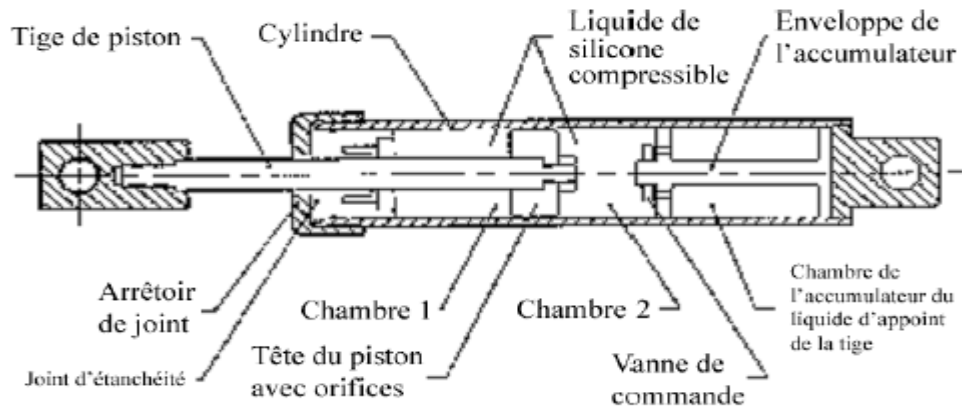


Figure II.6 Coupe transversale d'un amortisseur type visqueux à liquide

Quelques exemples d'utilisations pratiques de ces amortisseurs sont présentés ci-après :

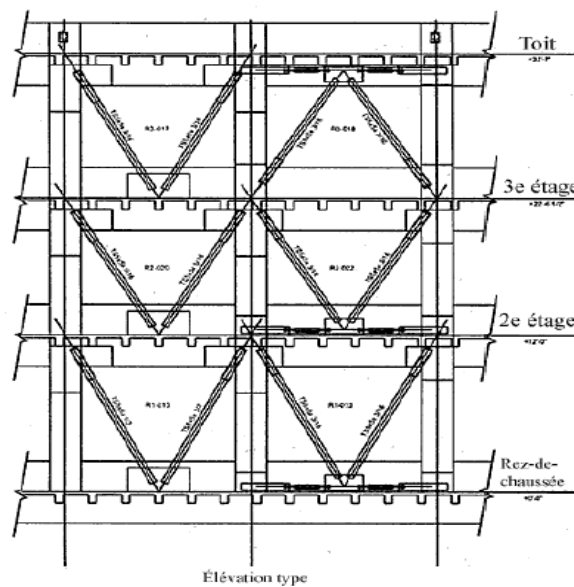


Figure II.7 Illustration des contreventements en V par amortisseur visqueux d'un bâtiment



Figure II.8 utilisation des amortisseurs en diagonale dans les bâtiments



Figure II.9 *Système de contreventement en acier avec amortisseurs visqueux disposés horizontalement*

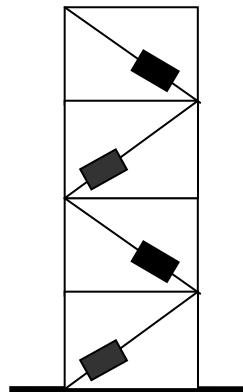


Figure II.11 : *Montage d'amortisseurs visqueux en superstructure*

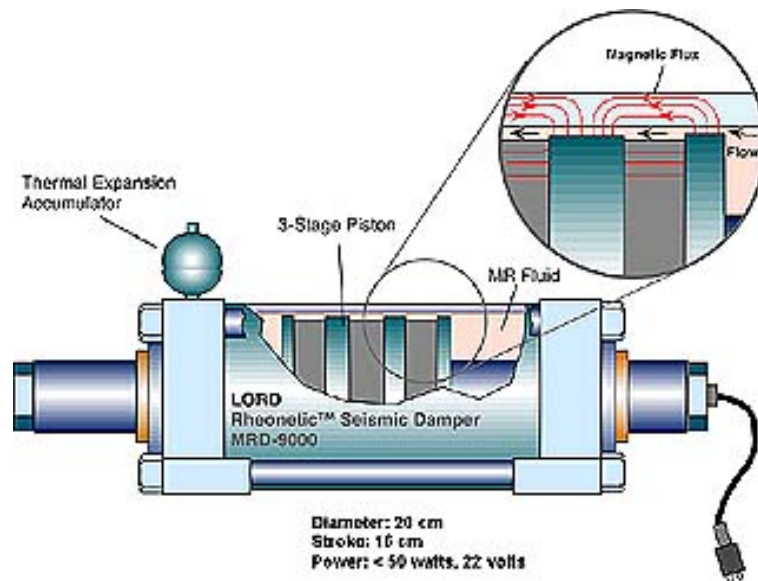


Figure II.12 *système d'amortisseurs actif*



Figure II.13 utilisation des amortisseurs

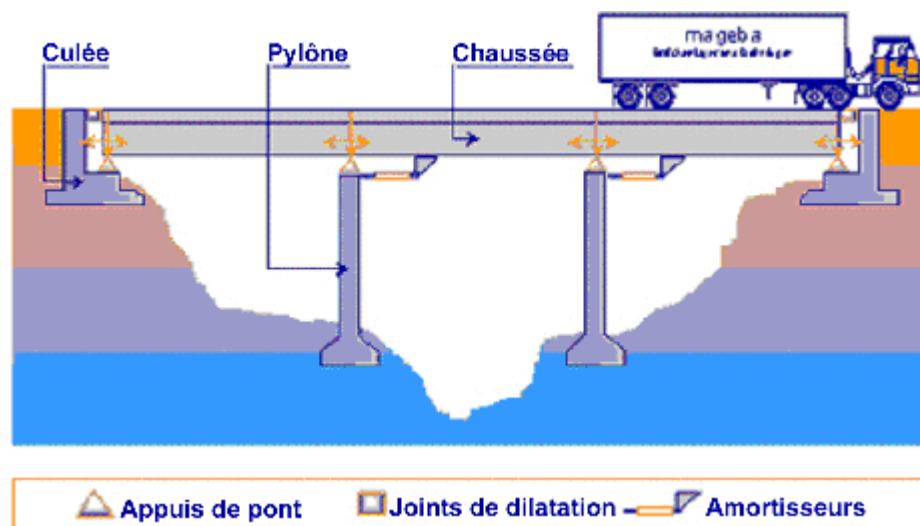


Figure II.14 amortisseurs dans les ponts

II.6.3 Amortisseur à frottement

Le frottement est un phénomène qui est en relation avec les transformations de l'énergie mécanique (énergie cinétique ou de mouvement) en énergie thermique (chaleur). Habituellement, dans les systèmes mécaniques (machines par exemple), le frottement constitue une entrave à leur fonctionnement idéal et engendre une dissipation d'une partie d'énergie fournie, dissipation qui apparaît comme une perte pour ces systèmes et par voie de conséquence, entraînant une diminution de leur rendement mécanique.

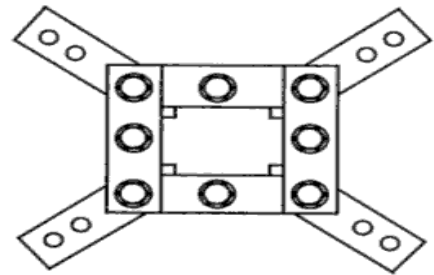
Dans les études de machines, le frottement est donc considéré et traité comme un phénomène nuisible. En revanche, dans le cas de la présente étude le frottement est considéré comme un avantage et donc un atout.

Les amortisseurs à friction comprennent une série de plaques fixées les unes aux autres par des boulons en acier à haute résistance et spécialement traitées pour produire un degré de friction maximale. Le principe de ces amortisseurs repose sur le phénomène de dissipation de l'énergie par friction qui apparaît sur les boucles d'hystérésis du diagramme charges-déformations, qui peuvent être rectangulaires.

Plusieurs dispositions de ces types d'amortisseurs sont possibles : les amortisseurs pour le contreventement transversal et le contreventement diagonal (fig. II.15).



Ossature contreventée par des
Amortisseurs à frottement



Détail du dispositif d'amortissement à
frottement

Figure II.15: *Amortisseur à frottement*

II.7. Conditions d'addition des amortisseurs aux constructions

L'addition des amortisseurs parasismiques dans les constructions pour assurer une bonne performance de dissipation d'énergie est difficile. Ils sont seulement adaptés à un nombre limité de structures. Par conséquent, il est d'une importance capitale de sélectionner les projets nécessitant l'addition des amortisseurs parasismiques dans la phase de conception.

La technique d'incorporer ou d'installer en parallèle des amortisseurs parasismiques aux structures isolées permet de contrôler la déformation du système d'isolation et de garder les déplacements de ce dernier et de la superstructure dans des limites admissibles [8]. En outre, les niveaux élevés d'amortissement supplémentaire ne sont pas nécessaires dans les systèmes d'isolation car ils provoquent des accélérations plus élevées dans la superstructure [7].

Les bâtiments souples conviennent à l'addition de l'amortissement supplémentaire plus que les bâtiments rigides. Plus le bâtiment est flexible plus la quantité d'amortissement est faible pour réduire la réponse sismique [9].

L'amortissement supplémentaire peut de manière significative réduire les mouvements sismiques et éloigner la période de la structure par rapport à la période de mouvement du sol afin d'éviter la résonance. Mais si la période de la structure et la période du mouvement du sol sont largement distinctes, l'amortissement supplémentaire peut avoir seulement un effet marginal sur la réponse. Les structures avec amortisseurs ne doivent pas être implantées dans les sites proches de failles sismiques [5].

Les limitations de la hauteur des bâtiments ne devraient pas excéder les limites recommandées pour les systèmes structuraux. Les systèmes structuraux appropriés à l'addition des amortisseurs sont les ossatures contreventées par des portiques autostables et les autres systèmes qui ne conviennent pas sont ceux où les déformations seront trop petites comme par exemple les contreventements en voiles [9].

Bien que le renforcement des bâtiments existants par les amortisseurs parasismiques limite les dommages et les coûts de réparation, une évaluation de ces bâtiments sans amortisseurs doit précéder avant que l'on considère l'addition d'amortissement.

Remarque : Les propriétés de quelques dispositifs de dissipation d'énergie peuvent varier en fonction des effets du vieillissement, de la température, de la fatigue et d'autres conditions environnementales. Par conséquent, ces dispositifs exigent des inspections régulières et des programmes d'essais rigoureux de contrôle de qualité afin d'éviter des ruptures prématurées [9].

II.8. lois de comportement des différents organes :

L'objectif attendu pour chacun des appareils parasismiques est étroitement lié à son comportement une fois soumis à une source de vibration.

L'analyse des différents appareils d'appuis disponibles permet d'obtenir la relation force-déplacement définie comme suit :

II.8.1. Ressort élastique

Les déplacements aller et retour suivent sensiblement la même trajectoire. Il n'y a donc pas d'énergie dépensée pendant un cycle, donc pas d'amortissement [4].

La courbe force-déplacement peut être proche d'une droite et d'un palier horizontal.

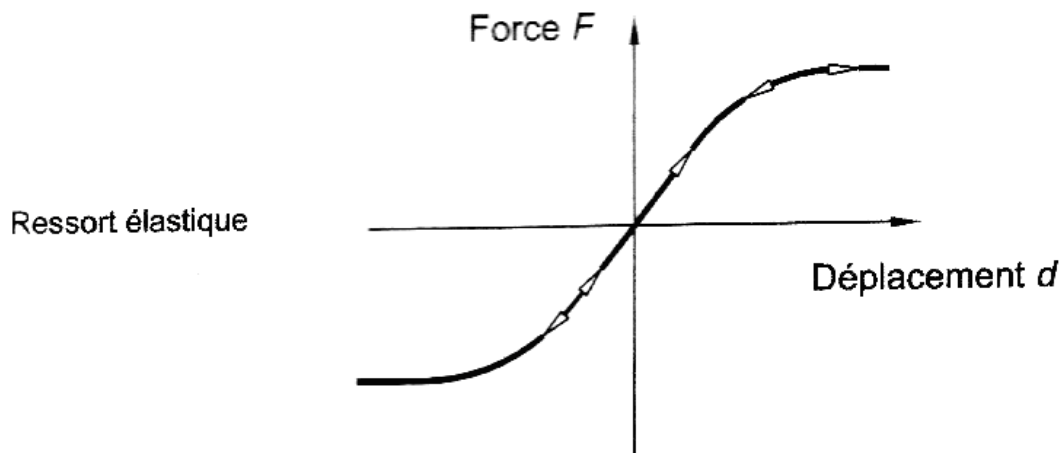


Figure II.16: comportement d'un ressort élastique

II.8.2. Fusible

Il s'agit d'un ressort élastique dont la résistance disparaît complètement dès que cette dernière dépasse un certain seuil. Cette fonction est par exemple obtenue avec une goupille métallique qui périt par cisaillement. Elle permet de supprimer la liaison du tablier avec un appui et donc passer d'une configuration en service à une configuration spécifique au séisme.

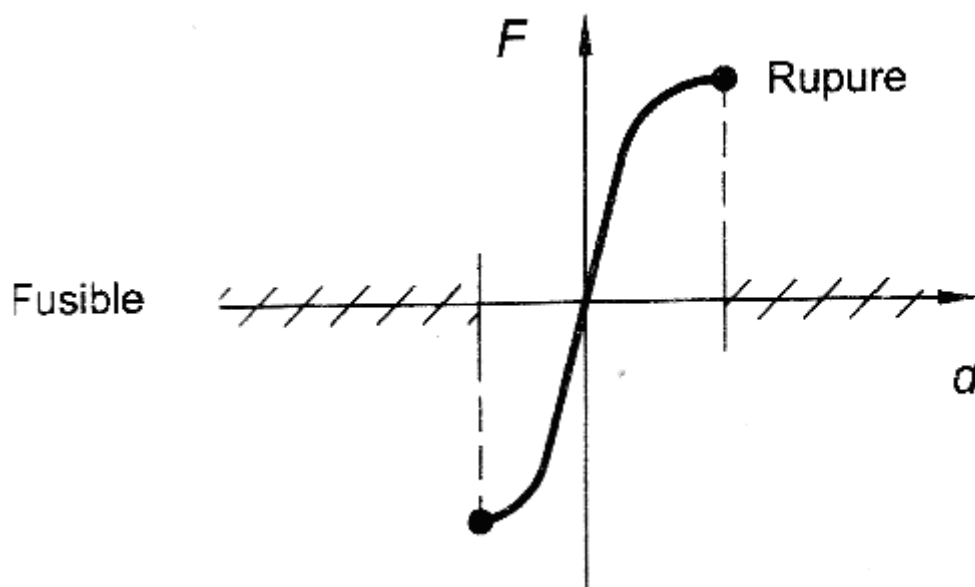


Figure II.17: comportement d'un fusible

II.8.3. Amortisseur visqueux

Les cycles force-déplacement dépendent de la vitesse. Chaque cycle dépense de l'énergie, d'où un amortissement du mouvement. Cette fonction est réalisée par des amortisseurs contenant un fluide plus ou moins visqueux.

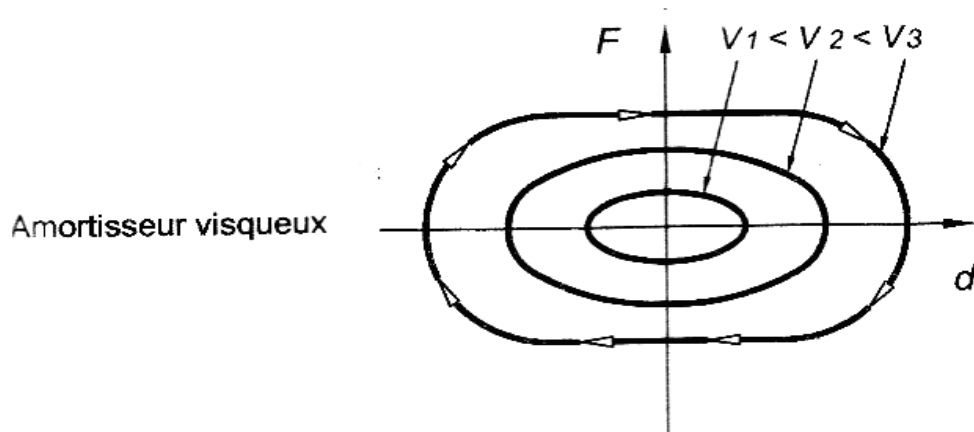


Figure II.18 : comportement d'un amortisseur visqueux

II.8.4. Fusible/amortisseur élasto-plastique

La relation force déplacement, indépendante de la vitesse, est du type élasto-plastique avec ($p_2 = 0$) ou sans ($p_2 = 0$) écrouissage.

Les cycles dépendent de l'énergie dès que la limite élastique est dépassée.

Cette fonction est assurée par des amortisseurs visqueux pilotés par des soupapes et des dispositifs à frottement.

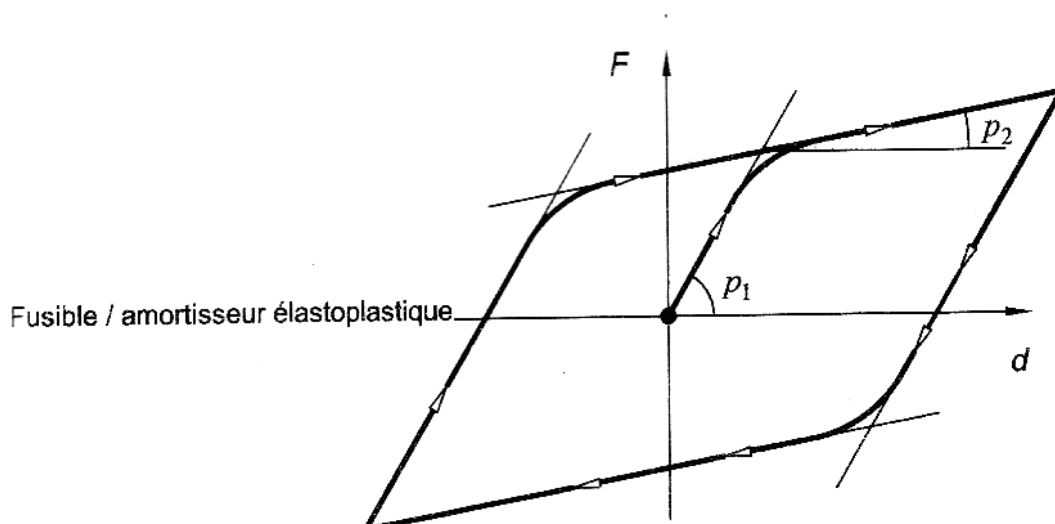


Figure II.19 : comportement d'un fusible/ amortisseur élastoplastique

II.8.5. Coupleur dynamique

Le déplacement est libre pour une vitesse très lente, très faible pour une vitesse au-delà d'un certain seuil. Cette fonction est remplie par des dispositifs métalliques et des amortisseurs visqueux réglés spécialement. Elle permet en cas de séisme de réaliser des liaisons supplémentaires entre les piles et le tablier.

**Chapitre III : Formulation du problème
d'amortissement et méthode de
dimensionnement des amortisseurs**

Formulation du problème d'amortissement et méthode de dimensionnement des amortisseurs

III. 1. Introduction

L'équation du mouvement dynamique est fondée sur trois composantes principales qui caractérisent une construction et sa structure : la masse mise en mouvement, la rigidité des éléments structuraux et les différents systèmes d'amortissement.

Ces composantes sont reliées respectivement aux grandeurs du mouvement : le déplacement, la vitesse et l'accélération.

Notre travail porte sur l'impact de l'addition de nouvel appareil d'amortissement sur le mouvement.

Nous allons ainsi procéder dans ce chapitre à la formulation de l'équation de mouvement avec intégration des amortisseurs, ensuite au dimensionnement des amortisseurs ;

III.2. Caractéristiques des amortisseurs visqueux

Ces dispositifs sont assimilables à un vérin hydraulique à doubles effets et à forte capacité de dissipation d'énergie. Ils comportent couramment deux chambres remplies d'un fluide (huile hydraulique ou pâte silicone). Celles-ci sont reliées l'une à l'autre par des soupapes calibrées de façon à permettre des déplacements lents et une dissipation d'énergie générée par frottement visqueux du fluide sous l'effet du mouvement sismique (rapide).

La relation entre la force d'amortissement et la vitesse relative V peut s'écrire comme suit [6]:

$$\mathbf{F} = \mathbf{C} V^{\alpha} \quad (\text{III-3})$$

V : la vitesse du piston (soupape),

C et α : sont des paramètres qui dépendent de la loi de comportement du fluide.

Tableau III.1 : différents types d'amortisseurs selon les différentes valeurs de l'exposant α [6].

Type d'amortisseur	Valeur de α	Force d'amortissement	Remarques
Amortisseur linéaire	$\alpha = 1$	$F = C V$	Amortisseur hydraulique classique
Amortisseur non linéaire	$\alpha = 0$	$F = C$	Amortisseur idéal à frottement sec
Amortisseur non linéaire	$\alpha \neq 0, 1$	$F = C V^\alpha$	Amortisseur visqueux intermédiaire

En général la valeur de l'exposant α varie entre 0.1 et 1.8 [6].

Les figures suivantes, montrent la loi de comportement des différents types d'amortisseurs soumis à une excitation sinusoïdale.

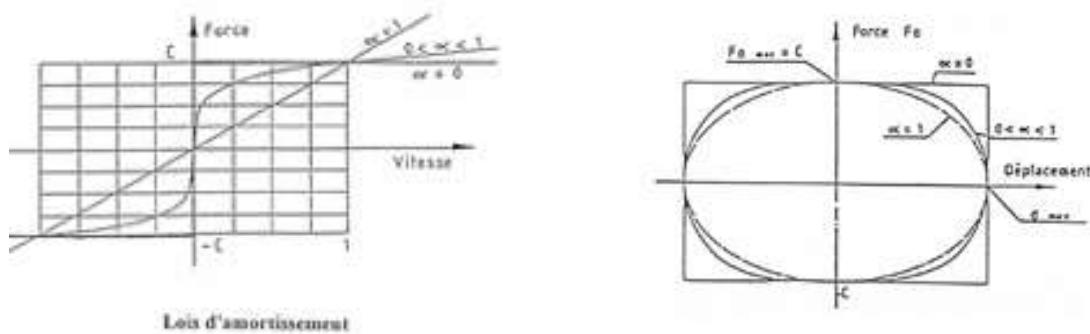


Figure III.1 : lois de comportements de différents types d'amortisseurs

Remarque

L'amortisseur liquide assure seulement l'amortissement dans sa direction axiale.

III.3. Formulation de l'équation du mouvement avec des amortisseurs

Le problème posé par les déplacements excessifs peut être résolu par l'augmentation de l'amortissement

En général l'équation d'équilibre dynamique de n'importe quel modèle est sous la forme suivante:

$$F_m + F_c + F_k = P(t) \tag{III-1}$$

F_m : Force d'inertie.

F_c : Force d'amortissement due à la structure.

F_m : Force de rigidité.

$P(t)$: Charge dynamique (variable en fonction du temps).

On peut donc écrire l'équation comme suit :

$$\mathbf{M} \ddot{U} + \mathbf{C} \dot{U} + \mathbf{K} U = P(t) \quad (\text{III-2})$$

\mathbf{M} : matrice de la masse de la structure,

\mathbf{C} : matrice d'amortissement,

\mathbf{K} : matrice de rigidité,

\ddot{U} , \dot{U} et U sont respectivement l'accélération, la vitesse et les déplacements du système.

La force d'amortissement due à un amortisseur est donnée par l'expression suivante [11] :

$$\mathbf{F} = \mathbf{C} \mathbf{V}^\alpha$$

Pour un système où l'on utilise des amortisseurs l'équation de mouvement devient :

$$F_m + F_c + F_c' + F_k = P(t) \quad (\text{III-4})$$

F_c' : force d'amortissement due à l'amortisseur ajouté au système, d'où l'équation de mouvement devient [11] :

$$\mathbf{M} \ddot{U} + \mathbf{C}_s \dot{U} + C_a V^\alpha + \mathbf{K} U = P(t) \quad (\text{III-5})$$

Lors de mouvement de système, la vitesse du piston V est égale à la vitesse de mouvement du système, donc $\dot{U} = V$

D'où l'équation devient [11] :

$$\mathbf{M} \ddot{U} + \mathbf{C}_s \dot{U} + C_a \dot{U}^\alpha + \mathbf{K} U = P(t) \quad (\text{III-6})$$

Et pour une excitation sismique l'équation s'écrit [11]:

$$\mathbf{M} \ddot{U} + \mathbf{C}_s \dot{U} + C_a \dot{U}^\alpha + \mathbf{K} U = -M \ddot{U}_g \quad (\text{III-7})$$

\ddot{U}_g : Accélération sismique du sol

On remarque bien que si α est égal à l'unité l'équation devient linéaire comme suit [11]:

$$\mathbf{M} \ddot{U} + (\mathbf{C}_s + C_a) \dot{U} + \mathbf{K} U = M \ddot{U}_g \quad (\text{III-8})$$

La résolution de cette équation devient classique comme elle a été introduite dans le chapitre IV par la méthode de Newmark ou par d'autres méthodes [11].

Si $\alpha \neq 1$ l'équation du mouvement précédente reste non linéaire et parmi les nombreuses méthodes d'intégration directe pour résoudre cette équation, la méthode d'intégration de Newmark semble être la plus efficace avec de très petites erreurs numériques. Dans la méthode de Newmark, on suppose que l'accélération est linéaire pendant le temps à $t + \Delta t$. Pour l'intervalle de temps Δt , les relations sont [11]:

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U}_t + [(1 - \beta)\ddot{U}_t + \beta\ddot{U}_{t+\Delta t}]\Delta t \quad (\text{III-9})$$

$$U_{t+\Delta t} = U_t + \dot{U}_t \Delta t + [(\frac{1}{2} - \alpha)\ddot{U}_t + \alpha\ddot{U}_{t+\Delta t}]\Delta t^2 \quad (\text{III-10})$$

α et β sont les paramètres employés pour obtenir l'exactitude et la stabilité d'intégration.

Dans le cas où $\alpha = \frac{1}{4}$ et $\beta = \frac{1}{2}$, la méthode d'accélération moyenne constante rapportera la stabilité sans conditions dans le procédé d'itération.

Les équations précédentes, $\dot{U}_{t+\Delta t}$ et $\ddot{U}_{t+\Delta t}$ peuvent être résolues en termes de $U_{t+\Delta t}$ comme suit [11]:

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U}_t + \Delta t(1 - \beta)\ddot{U}_t + \beta\Delta t\ddot{U}_{t+\Delta t} \quad (\text{III-11})$$

$$\ddot{U}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\alpha\Delta t^2}(U_{t+\Delta t} - U_t) - \frac{1}{\alpha\Delta t}\dot{U}_t - (\frac{1}{2\alpha} - 1)\ddot{U}_t \quad (\text{III-12})$$

Pour obtenir le déplacement, la vitesse et l'accélération au temps $t + \Delta t$, l'équation d'équilibre est écrite comme [11]:

$$\mathbf{M}\ddot{U}_{t+\Delta t} + \mathbf{C}_s\dot{U}_{t+\Delta t} + \mathbf{C}_a\dot{U}_{t+\Delta t}^\alpha + \mathbf{K}U_{t+\Delta t} = -\mathbf{M}(\ddot{U}_g)_{t+\Delta t}. \quad (\text{III-13})$$

$\mathbf{C}_a\dot{U}_{t+\Delta t}^\alpha$: Terme de la non linéarité.

Pour éviter d'employer la technique d'itération pour déterminer le vecteur de déplacement à chaque étape, le terme non linéaire $U_{t+\Delta t}^\alpha$ est développé par une série de Taylor comme montré dans l'équation suivante: [11]

$$\dot{U}_{t+\Delta t}^\alpha = \dot{U}_t^\alpha + r \cdot \text{diag} (\dot{U}_t^{\alpha-1})(\dot{U}_{t+\Delta t} - \dot{U}_t) \quad (\text{III-14})$$

On suppose que les limites d'ordre supérieur peuvent être négligées sans perte d'exactitude

diag : Opérateur de diagonalisation d'un vecteur à une matrice.

Les étapes de résolution sont comme suit [11] :

$$\tilde{\mathbf{K}}U_{t+\Delta t} = \tilde{\mathbf{P}}_{t+\Delta t} \quad (\text{III-15})$$

$$\tilde{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + \frac{1}{\alpha\Delta t^2}\mathbf{M} + \frac{\beta}{\alpha\Delta t}\mathbf{C}_m + \frac{r\beta}{\alpha\Delta t}\mathbf{C}_a \text{diag}(U_t^{\dot{\alpha}-1}) \quad (\text{III-16})$$

$$\tilde{\mathbf{P}}_{t+\Delta t} = -\mathbf{M}(\ddot{U}_g)_{t+\Delta t} + \mathbf{M}\mathbf{a}_M + \mathbf{C}_s\mathbf{a}_{C_s} + \mathbf{C}_a\mathbf{a}_{C_a} \quad (\text{III-17})$$

$$\mathbf{a}_M = \frac{1}{\alpha\Delta t^2}U_t + \frac{1}{\alpha\Delta t}\dot{U}_t + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1\right)\ddot{U}_t \quad (\text{III-18})$$

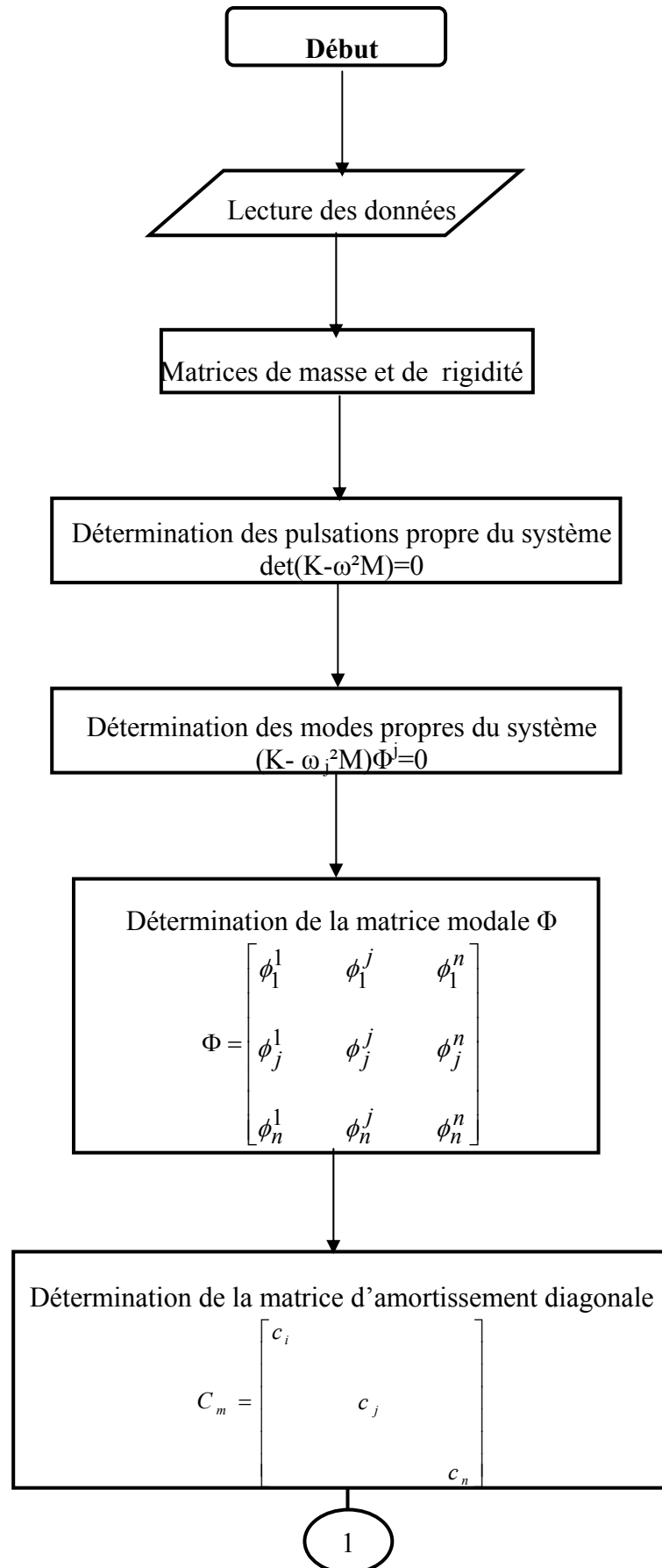
$$\mathbf{a}_{C_s} = \frac{\beta}{\alpha\Delta t}U_t + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1\right)\dot{U}_t + \Delta t\left(\frac{\beta}{2\alpha} - 1\right)\ddot{U}_t \quad (\text{III-19})$$

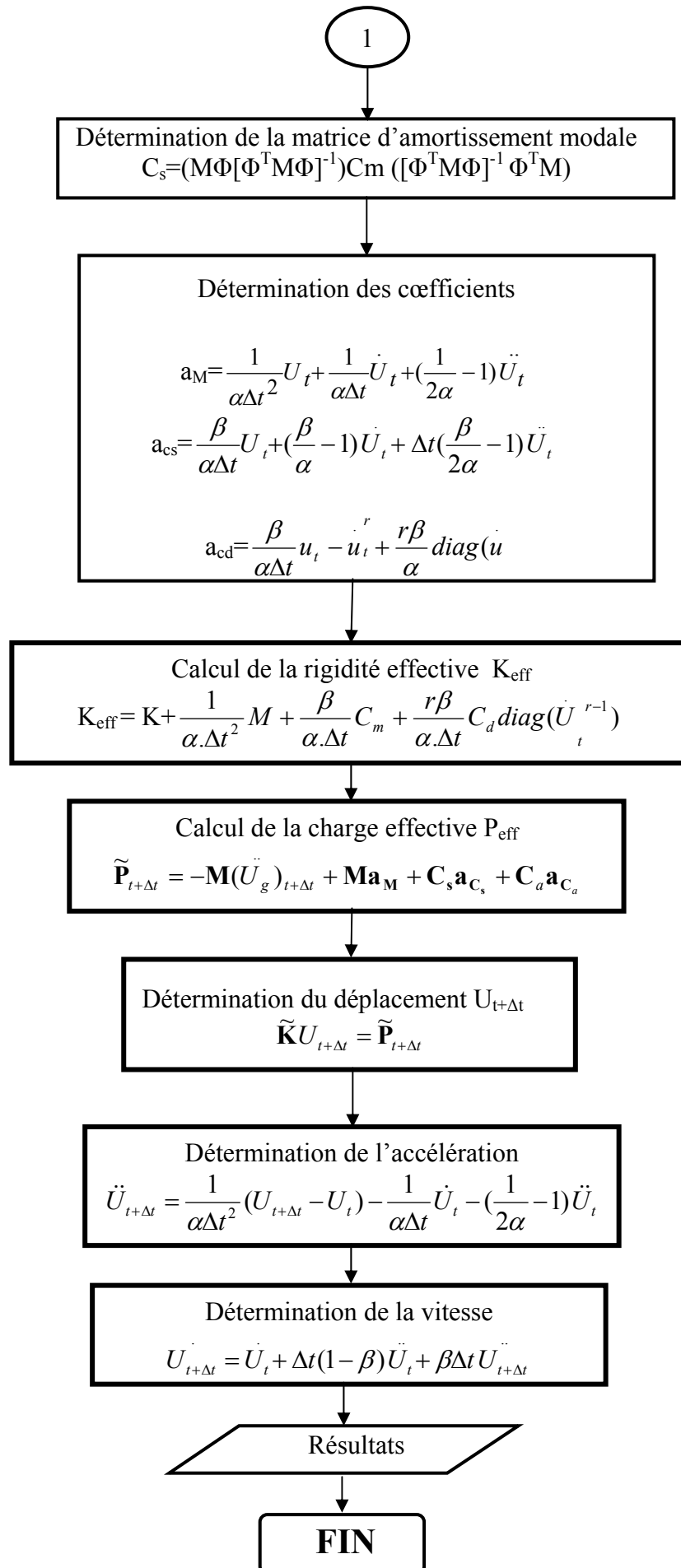
$$\mathbf{a}_{C_a} = \frac{\beta}{\alpha\Delta t}U_t - U_t^{\dot{\alpha}} + \frac{r\beta}{\alpha}\text{diag}(U_t^{\dot{\alpha}-1})\dot{W}_t + \beta\Delta t\left(\frac{1}{2\alpha} - 1\right)\ddot{U}_t - r\Delta t(1 - \beta)\text{diag}(U_t^{\dot{\alpha}-1})\ddot{U}_t \quad (\text{III-20})$$

La vitesse $\dot{U}_{t+\Delta t}$ et l'accélération $\ddot{U}_{t+\Delta t}$ peuvent être obtenues à partir des équations III-11 et 4-12 [11].

Nous présentons sous forme d'organigramme le cheminement des étapes de déterminations des grandeurs déplacements, vitesses et accélérations.

ORGANEGRAMME DE DETERMINATION DES DEPLACEMENTS, VITESSES ET ACCELERATIONS





III.4. Méthode de dimensionnement des amortisseurs visqueux non linéaire à partir d'un spectre de réponse

Le dimensionnement de ponts utilisant des amortisseurs visqueux non linéaires pour diminuer les effets du séisme, en termes de forces ou de déplacements, ne peut se justifier, à l'heure actuelle, que par des simulations non linéaires temporelles. Nous proposons ici une méthode de dimensionnement extrêmement simple qui ne fait appel qu'au spectre de réponse élastique fourni par le règlement. Cette méthode s'appuie sur une technique de linéarisation des lois de comportement des amortisseurs. Elle rend compte, de façon approchée, des mouvements sous séisme d'oscillateurs simples dotés de tels dispositifs

III.4.1. Démarche de dimensionnement

La démarche de dimensionnement des amortisseurs fondée sur un spectre de réponse se compose de plusieurs étapes (voir organigramme page 47) [12] :

A. Evaluation de la période propre de la structure

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (\text{III-21})$$

T la période propre de la structure

M masse du système

K rigidité du système

B. Evaluation du déplacement élastique

$$d = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 Sa(T, \zeta) \quad (\text{III-22})$$

d : déplacement élastique

Sa (T, ζ) : accélération du spectre élastique du règlement

C. Choix du coefficient de réduction de l'amplitude des déplacements

La valeur du coefficient de réduction ρ de l'amplitude des déplacements est donnée par le règlement [AFPS 95] :

$$\rho = \sqrt{\frac{0.07}{0.02 + \xi_{eq}}} \quad (\text{III-23})$$

ξ_{eq} : Amortissement équivalente du système

Cette formule est acceptable pour des valeurs d'amortissement comprises entre 2% et 30%

D. Dédution d'un taux d'amortissement équivalent

$$\xi_{eq} = \frac{0.07}{\rho^2} - 0.02 \tag{III-24}$$

E. déduction du taux d'amortissement ξ_{nl} provenant des amortisseurs seuls

$$\xi_{nl} = \xi_{eq} - \xi_{visqueux} \tag{III-25}$$

ξ_{nl} Amortissement des amortisseurs

ξ_{eq} Amortissement équivalente

$\xi_{visqueux}$ Amortissement visqueux de structure (5 à 7 %)

Dans le cas où l'amortissement visqueux égale à 5 %

$$\xi_{nl} = \xi_{eq} - 0.05 = \frac{0.07}{\rho^2} - 0.07 = 0.07 \left(\frac{1}{\rho^2} - 1 \right) \tag{III-26}$$

F. Détermination du paramètre d'amortissement c a mettre en œuvre :

$$C = \left(M \frac{4\pi}{T} \xi_{nl} \frac{1}{h(\alpha)} \left[\rho \frac{T}{2\pi} Sa (T, \zeta) \right]^{1-\alpha} \right) \tag{III-27}$$

α :exposant de la vitesse lié aux lois de comportement de l'amortisseur

$h(\alpha)$: fonction de linéarisation

$$h(\alpha) = 0.0892 \alpha^2 - 0.3583 \alpha + 1.2699$$

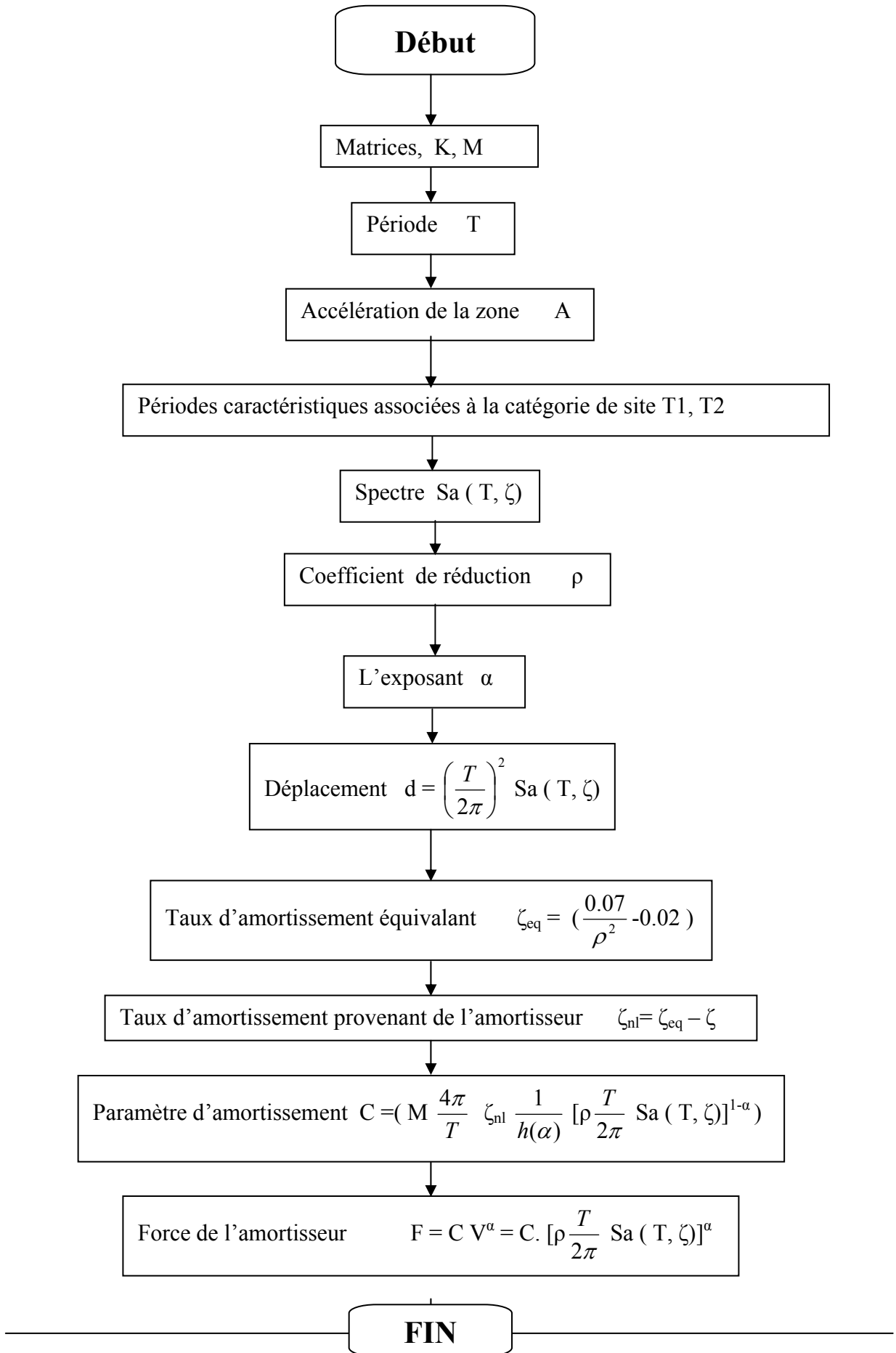
G. Détermination de la force maximale supportée par les amortisseurs

$$F = C V^\alpha = C. \left[\rho \frac{T}{2\pi} Sa (T, \zeta) \right]^\alpha \tag{III-28}$$

F : force maximale de l'amortisseur

L'organigramme suivant résume les différentes étapes de dimensionnement des amortisseurs

ORGANIGRAMME DE DIMENSIONNEMENT DES AMORTISSEURS



Chapitre IV : Application numérique sur un oscillateur simple

Application numérique sur un oscillateur simple

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à une application portant sur un oscillateur simple. Nous nous intéressons plus exactement à la variation du déplacement en fonction de la variation de l'amortissement en considérant comme source d'excitation le signal sismique d'El Centro.

Nous présentons d'abord l'aspect théorique, suivi d'un organigramme qui résume les étapes de calcul des déplacements.

L'exploitation de cet organigramme nous a permis d'élaborer un programme en FORTRAN dont les résultats de simulation sont représentés graphiquement.

IV.2. Formulation mathématique du problème

On considère un oscillateur simple lié au sol et caractérisé par sa pulsation ω et son coefficient d'amortissement ξ . Il est soumis aux effets d'un séisme, c'est à dire que son point d'appui se déplace avec une accélération du sol donnée par un accélérogramme, comme par exemple celui d'El Centro du 18 mai 1940.

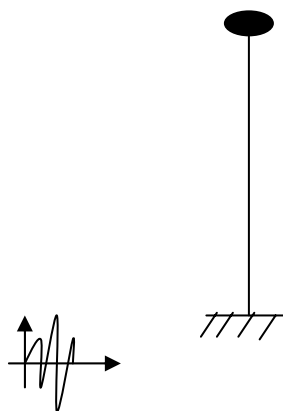
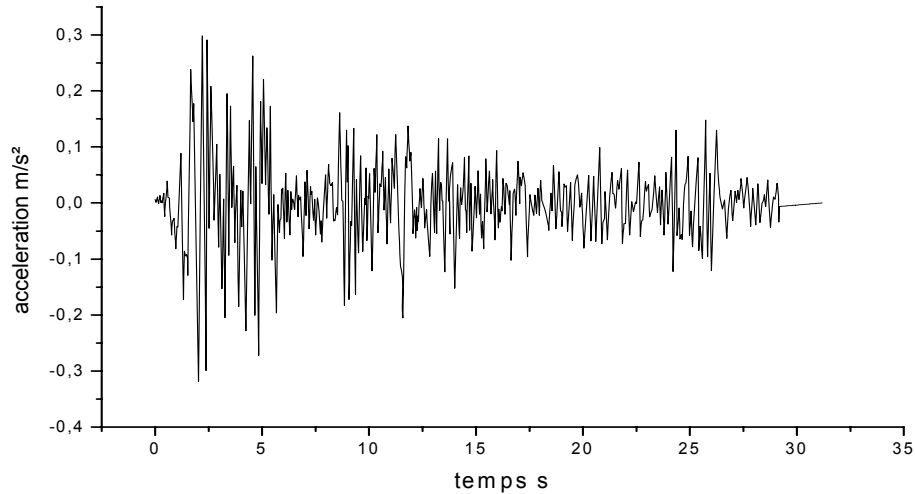


Figure IV.1 Oscillateur simple



Grphe IV.1 : *Signal séismique d' El- centro*

On calcule les déplacements dus au signal sismique avec différentes valeurs d'amortissement à l'aide de l'intégral du Duhamel :

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_D} \int_0^t p(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t - \tau) d\tau \tag{IV-1}$$

Cette équation est appelée intégrale de Duhamel, qui est basée sur le principe de superposition. Elle n'est applicable qu'à des systèmes linéaires.

Pour calculer numériquement cette réponse, on a :

$$\sin(\omega_D t - \omega_D \tau) = \sin \omega_D t \cos \omega_D \tau - \cos \omega_D t \sin \omega_D \tau$$

Donc :

$$u(t) = \frac{\sin \omega_D t}{m\omega_D} \int_0^t p(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos(\omega_D \tau) d\tau - \frac{\cos \omega_D t}{m\omega_D} \int_0^t p(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin(\omega_D \tau) d\tau \tag{IV-2}$$

Posons :

$$A(t) = \frac{1}{m\omega_D} \int_0^t p(\tau) \frac{e^{\xi\omega\tau}}{e^{\xi\omega t}} \cos(\omega_D \tau) d\tau \tag{IV-3}$$

et

$$B(t) = \frac{1}{m\omega_D} \int_0^t p(\tau) \frac{e^{\xi\omega\tau}}{e^{\xi\omega t}} \sin(\omega_D \tau) d\tau \tag{IV-4}$$

L'équation IV-2 prend la forme suivante:

$$u(t) = A(t) \sin \omega_D t - B(t) \cos \omega_D t \tag{IV-5}$$

En résolvant ces intégrales, on détermine la réponse $u(t)$. Le chargement dynamique $p(t)$ est dû à une accélération $\ddot{a}(t)$ d'un signal sismique (El-centro 18 mai 1940 composante SO-OE par exemple),

Notons que la force effective due à cette accélération est donnée par :

$$P_{\text{eff}}(\tau) = -m \ddot{a}(\tau)$$

Donc :

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{a}(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (\text{IV-6})$$

$$A(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{a}(\tau) \frac{e^{\xi\omega\tau}}{e^{\xi\omega t}} \cos(\omega_D\tau) d\tau \quad (\text{IV-7})$$

$$B(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{a}(\tau) \frac{e^{\xi\omega\tau}}{e^{\xi\omega t}} \sin(\omega_D\tau) d\tau \quad (\text{IV-8})$$

On ne peut pas résoudre ces intégrales par les méthodes classiques. On utilise alors un procédé de sommation :

$$\text{Donc :} \quad A(t) = -\frac{\Delta t}{\omega_D} \times \frac{1}{\zeta} \times \sum_{\zeta}^A(t) \quad (\text{IV-9})$$

$$B(t) = -\frac{\Delta t}{\omega_D} \times \frac{1}{\zeta} \times \Omega_{\zeta}^A(t) \quad (\text{IV-10})$$

Parmi les méthodes de résolution, il existe trois qui sont les plus souvent utilisées : méthode par simple sommation, méthode de trapèze et méthode de Simpson.

1. Simple sommation ($\zeta=1$) :

$$\sum_1^A(t) = \left[\sum_1^A(t-\Delta t) + \ddot{a}(t-\Delta t) \times \cos \omega_D(t-\Delta t) \right] \times e^{(-\xi\omega\Delta t)} \quad (\text{IV-11})$$

$$\Omega_1^A(t) = \left[\Omega_1^A(t-\Delta t) + \ddot{a}(t-\Delta t) \times \sin \omega_D(t-\Delta t) \right] \times e^{(-\xi\omega\Delta t)} \quad (\text{IV-12})$$

2. Méthode des trapèzes ($\zeta=2$)

$$\sum_2^A(t) = \left[\sum_2^A(t-\Delta t) + \ddot{a}(t-\Delta t) \times \cos \omega_D(t-\Delta t) \right] \times e^{(-\xi\omega\Delta t)} + \ddot{a}(t) \times \cos \omega_D t \quad (\text{IV-13})$$

$$\Omega_2^A(t) = \left[\Omega_2^A(t - \Delta t) + \ddot{a}(t - \Delta t) \times \sin \omega_D(t - \Delta t) \right] \times e^{(-\xi\omega\Delta t)} + \ddot{a}(t) \times \sin \omega_D t \quad (\text{IV-14})$$

3. Méthode de Simpson ($\zeta=3$)

$$\sum_3^A(t) = \left[\sum_3^A(t - 2\Delta t) + \ddot{a}(t - 2\Delta t) \times \cos \omega_D(t - 2\Delta t) \right] \times e^{(-\xi\omega 2\Delta t)} + \left[4\ddot{a}(t - \Delta t) \times \cos \omega_D(t - \Delta t) \right] \times e^{(-\xi\omega\Delta t)} + \ddot{a}(t) \times \cos \omega_D t \quad (\text{IV-15})$$

$$\Omega_3^A(t) = \left[\Omega_3^A(t - 2\Delta t) + \ddot{a}(t - 2\Delta t) \times \sin \omega_D(t - 2\Delta t) \right] \times e^{(-\xi\omega 2\Delta t)} + \left[4\ddot{a}(t - \Delta t) \times \sin \omega_D(t - \Delta t) \right] \times e^{(-\xi\omega\Delta t)} + \ddot{a}(t) \times \sin \omega_D t \quad (\text{IV-16})$$

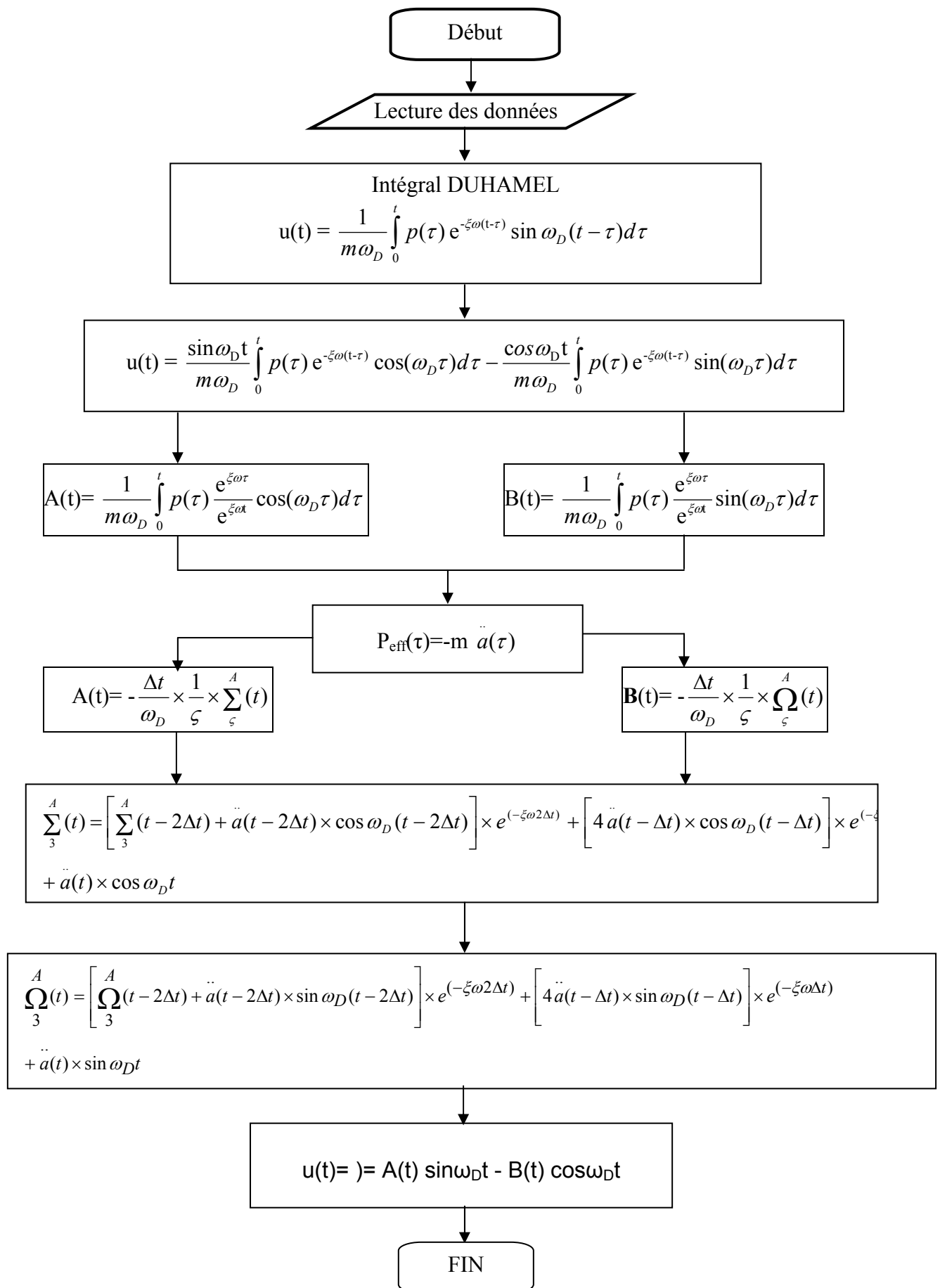
La précision attendue ici de la solution dépend évidemment de la durée de l'intervalle Δt . En général, cet intervalle doit être choisi suffisamment court à la fois pour que la fonction de chargement et les fonctions trigonométriques soient bien définies : $\Delta t \leq \frac{T}{10}$. C'est la règle pratique qui est largement utilisée et qui donne de bons résultats.

La précision et le volume des calculs nécessaires augmentent avec l'ordre du procédé de sommation. En règle générale, la précision accrue que procure la méthode de Simpson justifie son utilisation en dépit d'une plus grande complexité numérique.

Les résultats obtenus sont représentés dans les graphes suivants avec différentes valeurs de coefficients d'amortissements et pulsations :

L'organigramme suivant résume les différentes étapes de résolution de ce problème

Organigramme de résolution

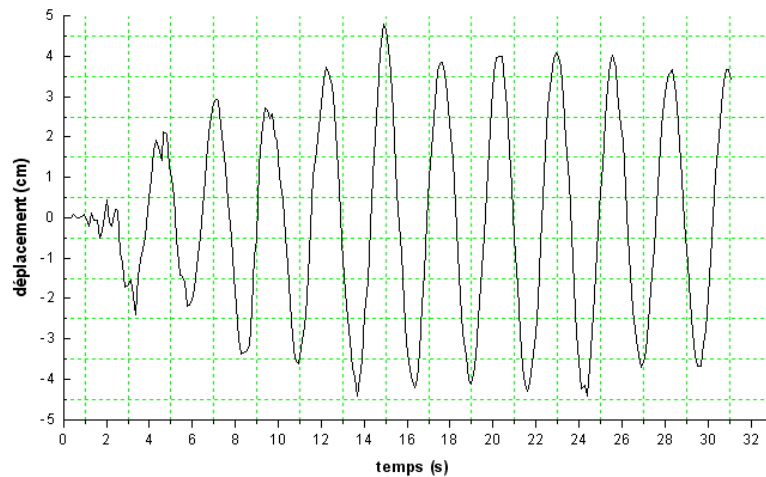


IV.3. Application (oscillateur simple)

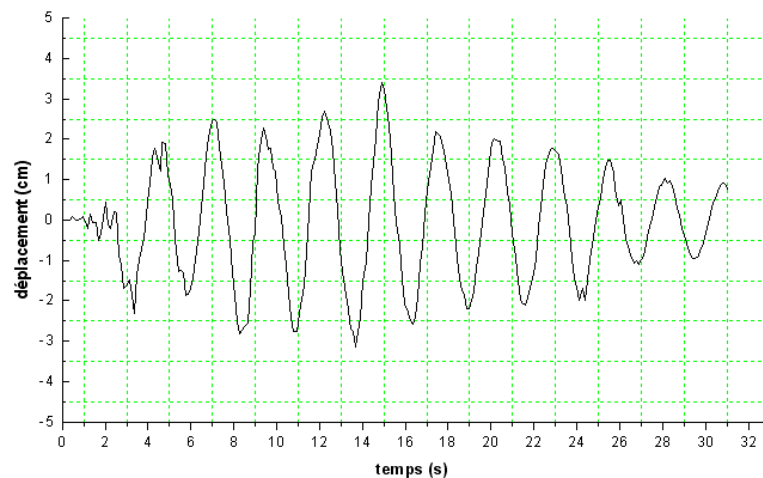
Pour mettre en évidence le lien qui existe entre la souplesse de la structure et l'amortissement qu'il faut avoir pour réduire les déplacements qui en sont engendrés, nous allons faire varier le taux d'amortissement en adoptant comme paramètre la pulsation ω .

Les résultats de cette étude sont représentés par les graphes illustratifs présentés ci après. Nous faisons varier le taux d'amortissement ξ pour différentes valeurs de pulsation ω , les résultats représentés par les graphes ci après :

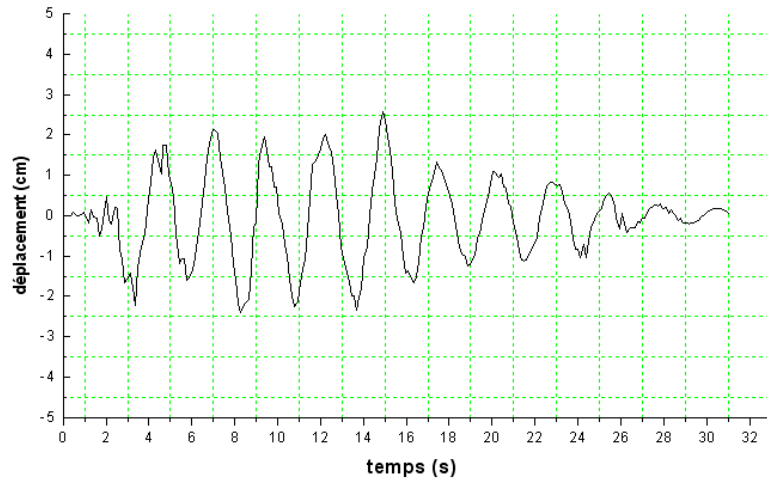
1. pulsation $\omega=1$:



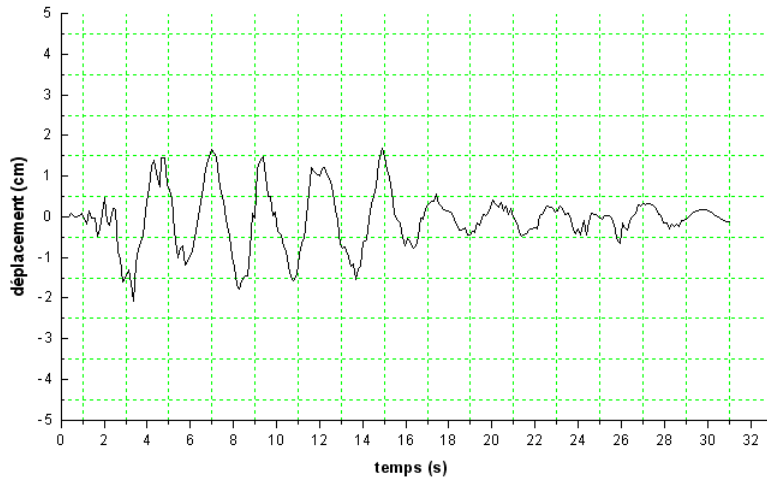
Graphe IV.2 : variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=1$ et $\xi=0\%$



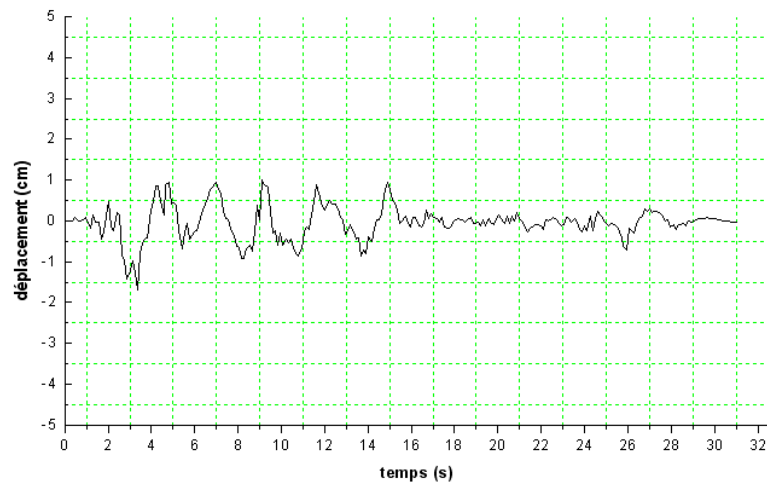
Graphe IV.3 : variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=1$ et $\xi=5\%$



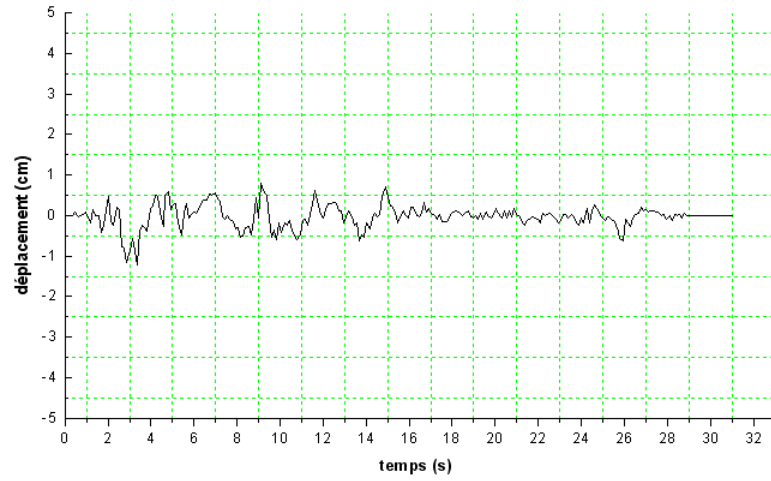
Graphe IV.4 : *variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=1$ et $\xi=10\%$*



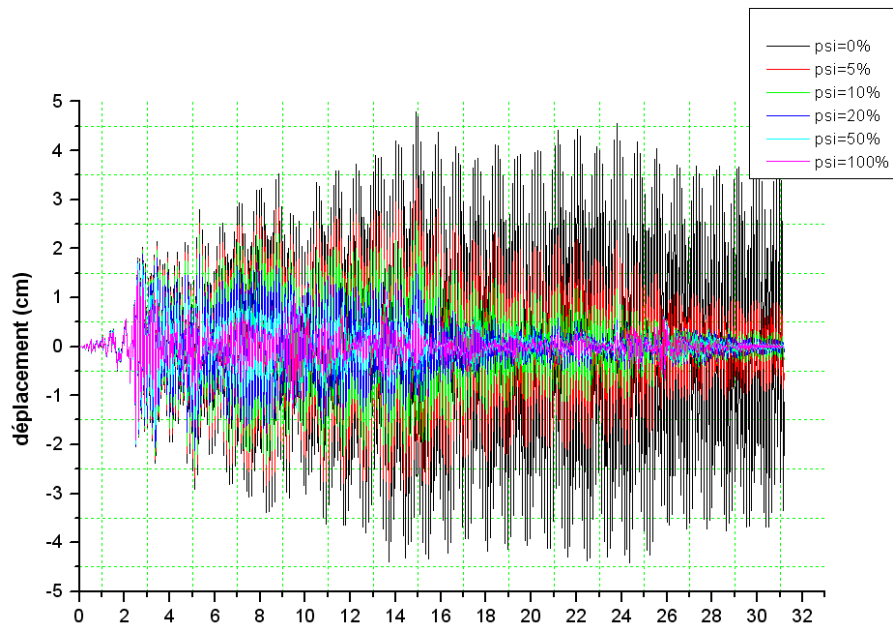
Graphe IV.5 : *variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=1$ et $\xi=20\%$*



Graphe IV.6 : *variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=1$ et $\xi=50\%$*



Grphe IV.7 : *variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=1$ et $\xi=100\%$*

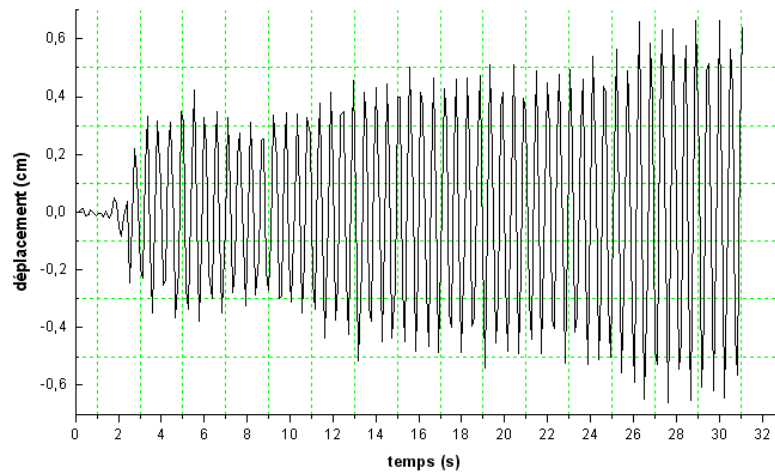


Grphe IV.8 : *comparaison des déplacements de différentes valeurs de ξ avec $\omega=1$*

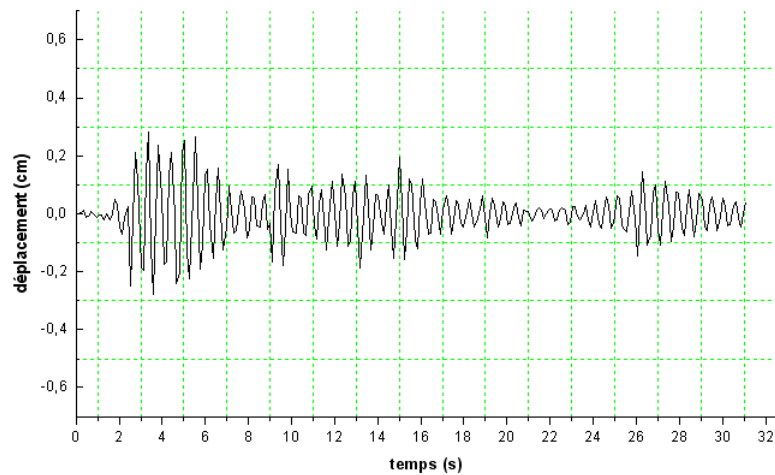
Tableau IV.1 *valeur du déplacement maximal*

Pulsation $\omega=1$	
Taux d'amortissement ξ (%)	Déplacement maximal (cm)
0	4.68
5	3.23
10	2.36
20	2.07
50	1.68
100	1.23

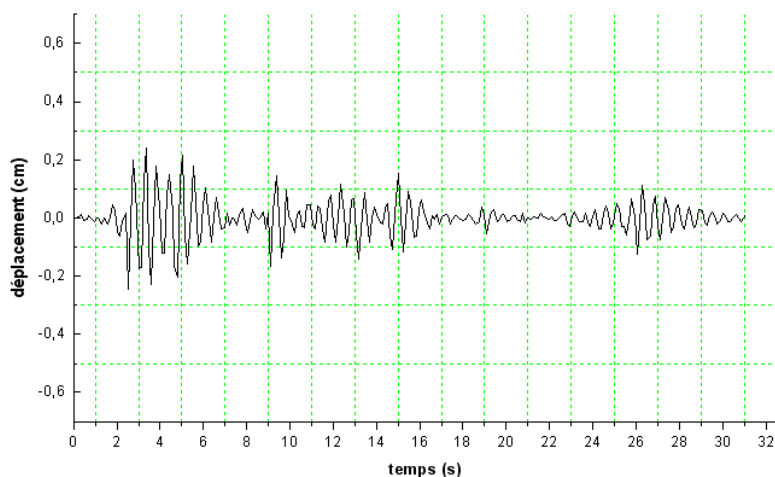
2. Pulsation $\omega=5$:



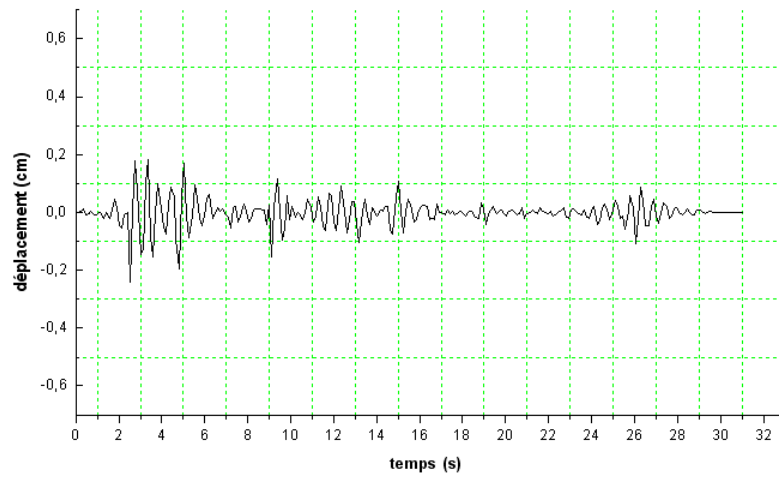
Graphe IV.9 : variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=5$ et $\xi=0\%$



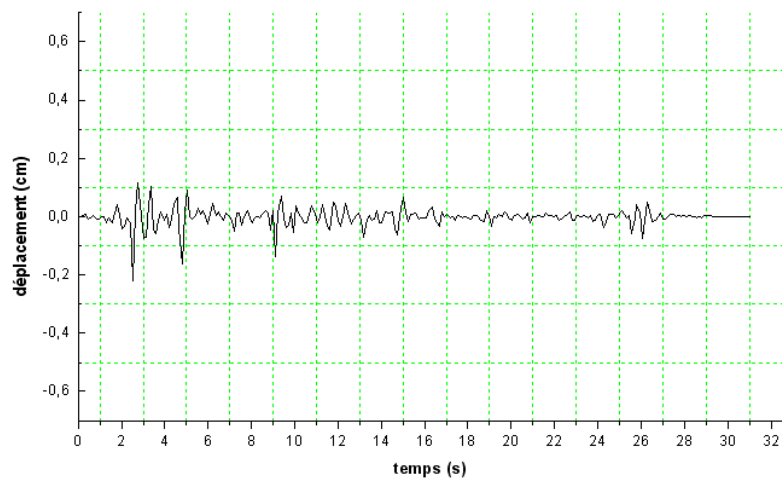
Graphe IV.10 : variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=5$ et $\xi=5\%$



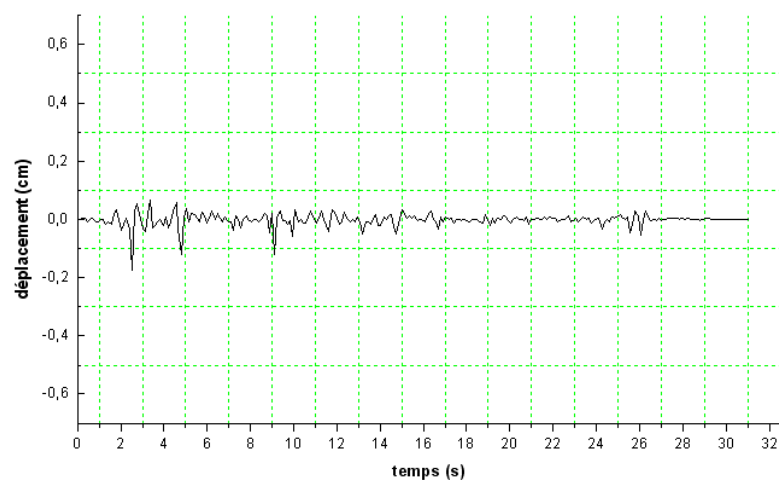
Graphe IV.11 : variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=5$ et $\xi=10\%$



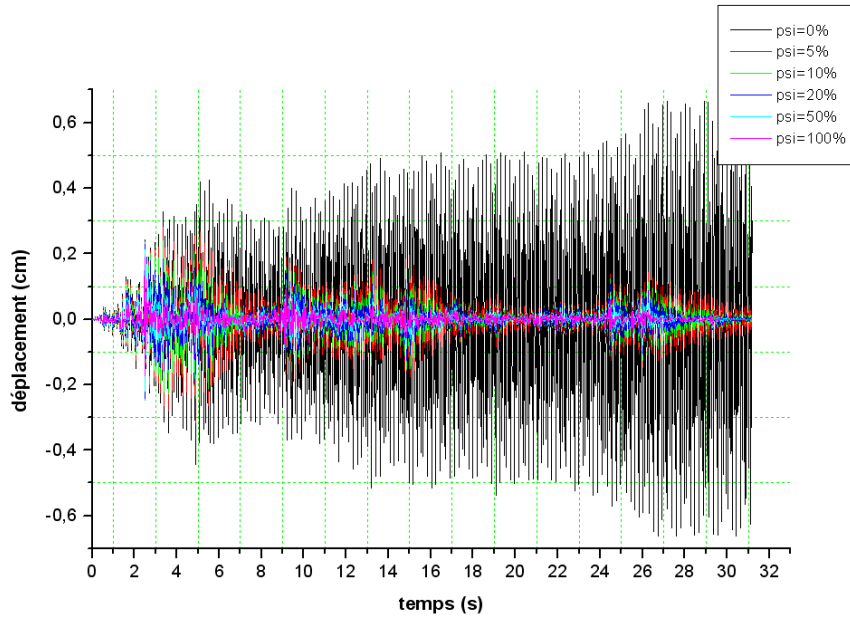
Grphe IV.12 : *variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=5$ et $\xi=20\%$*



Grphe IV.13 : *variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=5$ et $\xi=50\%$*



Grphe IV.14 : *variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=5$ et $\xi=100\%$*

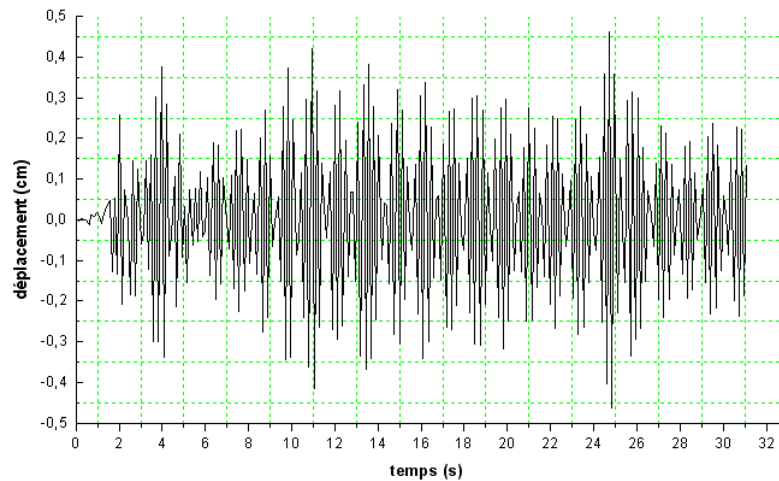


Graphe IV.15 : comparaison des déplacements de différentes valeurs de ξ avec $\omega=5$

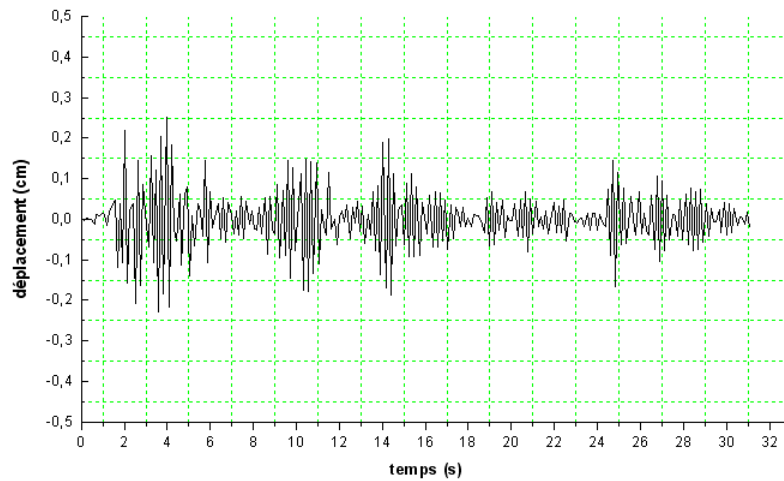
Tableau IV.2 valeur du déplacement maximal

Pulsation $\omega=5$	
Taux d'amortissement ξ (%)	Déplacement maximal (cm)
0	0.66
5	0.28
10	0.24
20	0.24
50	0.21
100	0.19

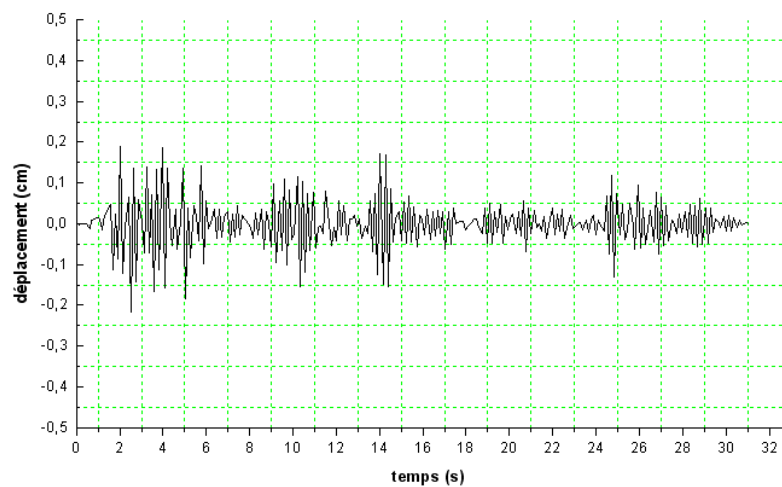
3. Pulsation $\omega=10$:



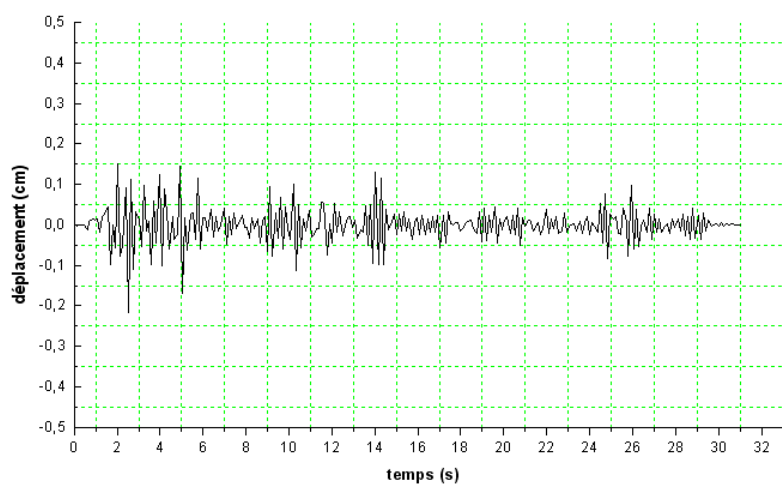
Graphe IV.16 : variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=10$ et $\xi=0\%$



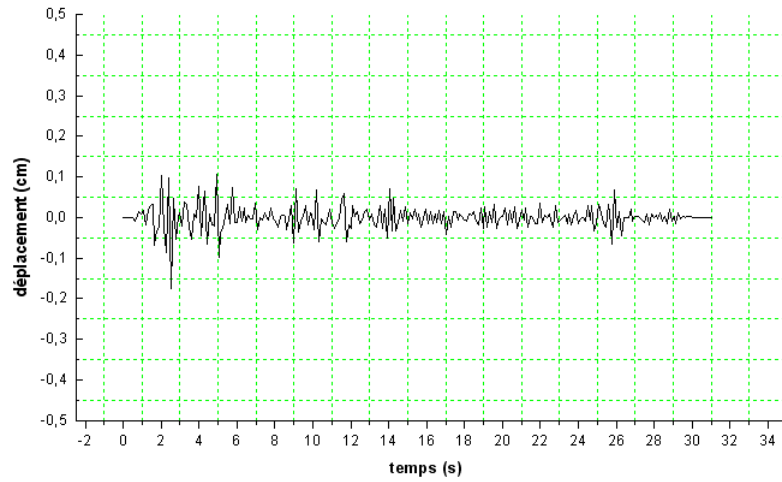
Graphe IV.17 : *variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=10$ et $\xi=5\%$*



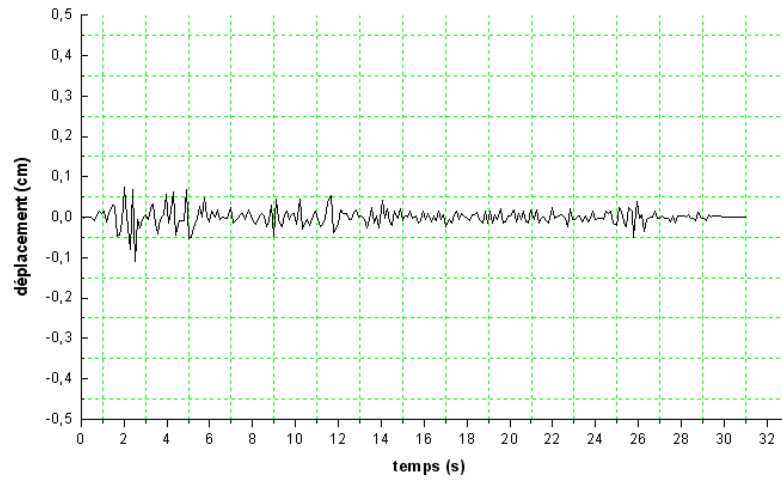
Graphe IV.18 : *variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=10$ et $\xi=10\%$*



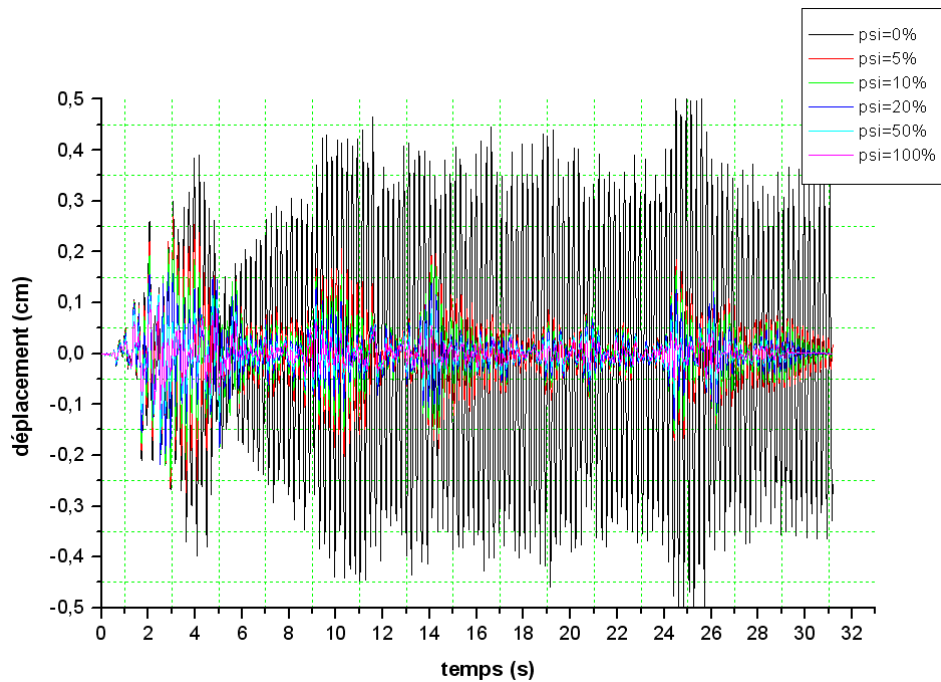
Graphe IV.19 : *variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=10$ et $\xi=20\%$*



Graph IV.20 : *variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=10$ et $\xi=50\%$*



Graph IV.21 : *variation de déplacement en fonction du temps avec $\omega=10$ et $\xi=100\%$*



Graph IV.22 : *comparaison des déplacements en fonction de ξ avec $\omega=5$*

Tableau IV.3 valeur du déplacement maximal

Pulsation $\omega=10$	
Taux d'amortissement ξ (%)	Déplacement maximal (cm)
0	0.46
5	0.25
10	0.21
20	0.20
50	0.17
100	0.11

Tableau IV.4 récapitulatif des valeurs du déplacement maximal

	Pulsation $\omega=1$	Pulsation $\omega=5$	Pulsation $\omega=10$
Taux d'amortissement ξ (%)	Déplacement maximal (cm)	Déplacement maximal (cm)	Déplacement maximal (cm)
0 %	4.68	0.66	0.46
5 %	3.23	0.28	0.25
10 %	2.36	0.24	0.21
20 %	2.07	0.24	0.20
50 %	1.68	0.21	0.17
100 %	1.23	0.19	0.11

Conclusion :

On peut tirer comme conclusion que les déplacements augmentent lorsque la période augmente (principe de l'isolateur sismique) et que les déplacements diminuent quand l'amortissement augmente. Ceci montre bien l'utilité d'incorporer ces genres des dispositifs dans des structures de grande ampleur afin de diminuer considérablement les déplacements et aussi bien les sollicitations.

Chapitre V : Application (pont et portique) et développement d'un logiciel de dimensionnement des amortisseurs

Applications (pont et portique) et dimensionnement des amortisseurs

V.1. Introduction

La prise en compte du risque sismique pour les structures conduit à des actions horizontales de dimensionnement qui peuvent être très importantes. On est parfois amené à changer le schéma de fonctionnement de la structure pour diminuer les efforts induits. Il s'agit, par exemple, d'assouplir la structure en isolant la superstructure (isolateur sismique) et de diminuer ainsi les efforts au niveau des appuis, aux prix de déplacements relatifs plus importants de la superstructure sur ceux-ci. On peut encore diminuer forfaitairement ces efforts en acceptant un certain niveau d'endommagement (*notion de la rotule plastique et coefficient de comportement*) des dispositifs parasismiques. Les structures équipées d'appareils d'appuis spéciaux (fusible, amortisseur, etc...) destinés à améliorer le comportement de ces ouvrages sous sollicitations sismiques connaissent un développement important. Ces dispositifs sont utilisés aussi bien dans la réalisation de structures neuves que dans la réhabilitation sismique d'ouvrages existants.

Parmi les dispositifs spéciaux, les amortisseurs ont pour objectif de diminuer à la fois les efforts et les déplacements en dissipant l'énergie induite dans l'ouvrage.

Dans ce chapitre, on se propose de faire une application de l'utilisation des amortisseurs dans le domaine du génie civil notamment le domaine des ouvrages d'arts qui sont très sensibles au séisme.

Parmi les rares outils automatiques qui traitent de ce genre d'organes parasismiques, le SAP2000 qui permet d'analyser des structures avec amortisseurs (*damper*) à travers une interface graphique puissante et facile d'utilisation. Cette facilité est rendue possible par le fait que la création du modèle structurel, son analyse et ses résultats sont réalisés à l'aide des interfaces simples et conviviales. De même plusieurs fonctions relatives aux éléments non linéaires tels que les dispositifs d'isolation et les amortisseurs sont disponibles.

L'utilisation des amortisseurs nécessite la caractérisation de la capacité portante de ces derniers. Motivés pour ce souci, nous allons développer un logiciel de dimensionnement des amortisseurs.

V.3. Exemples étudiés

Nous nous proposons donc comme modèles à étudier un portique en béton armé et un pont caisson à deux travées de 60 m chacune

V.3.1. Cas d'un portique

Nous considérons un portique (figure V.1) en béton armé de 5 m de hauteur et de 4 m de portée et de section transversale constante égale 30x30 cm².

Ce portique est considéré soumis au signale de référence d'El Centro. Nous allons déterminer les diagrammes des réponses déplacements, vitesses et accélérations pour les deux cas de figures : portique sans amortisseur et portique avec amortisseur.

V.3.1.1. Portique sans amortisseur

Les réponses sont représentées graphiquement et suivies d'un tableau récapitulatif de leurs valeurs maximales.

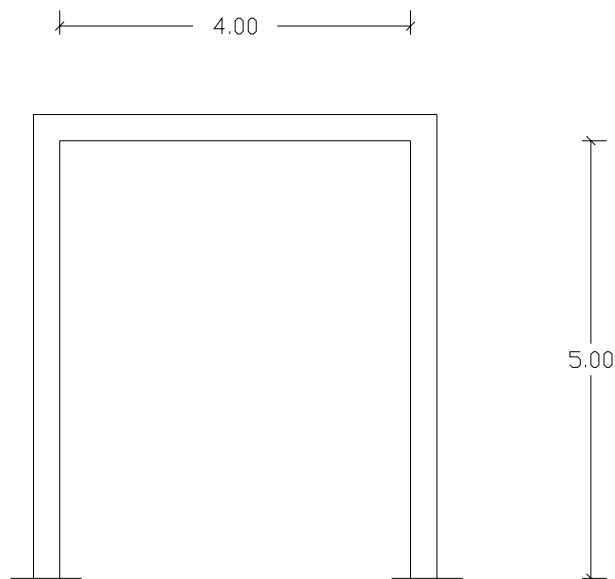
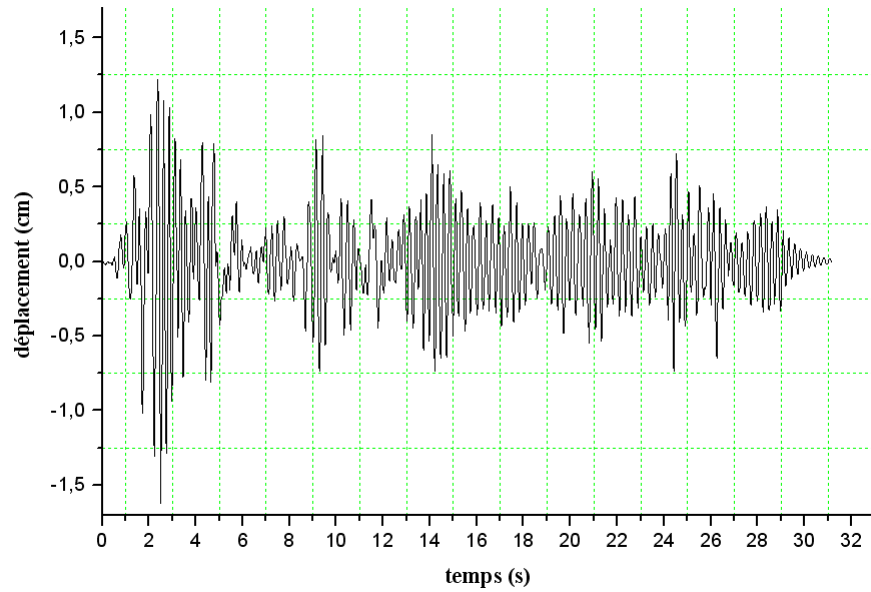
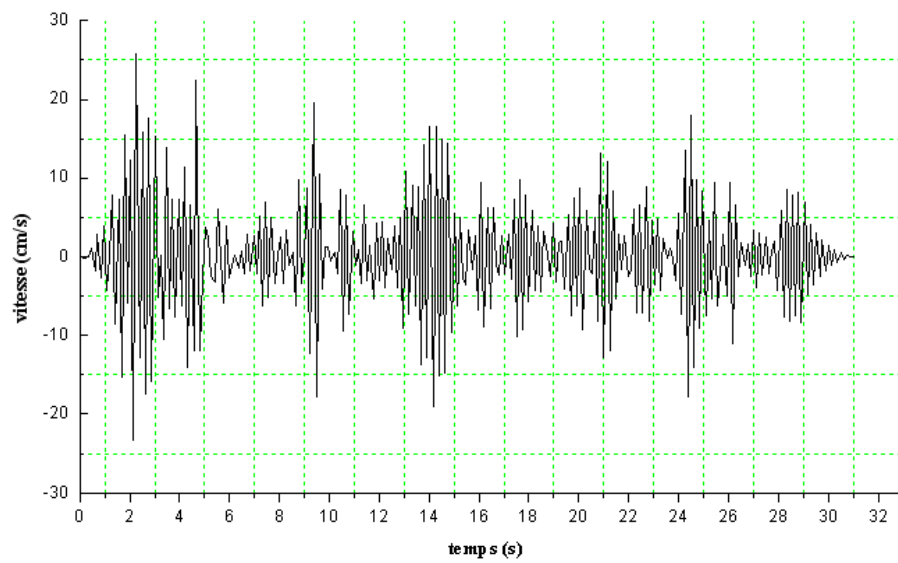
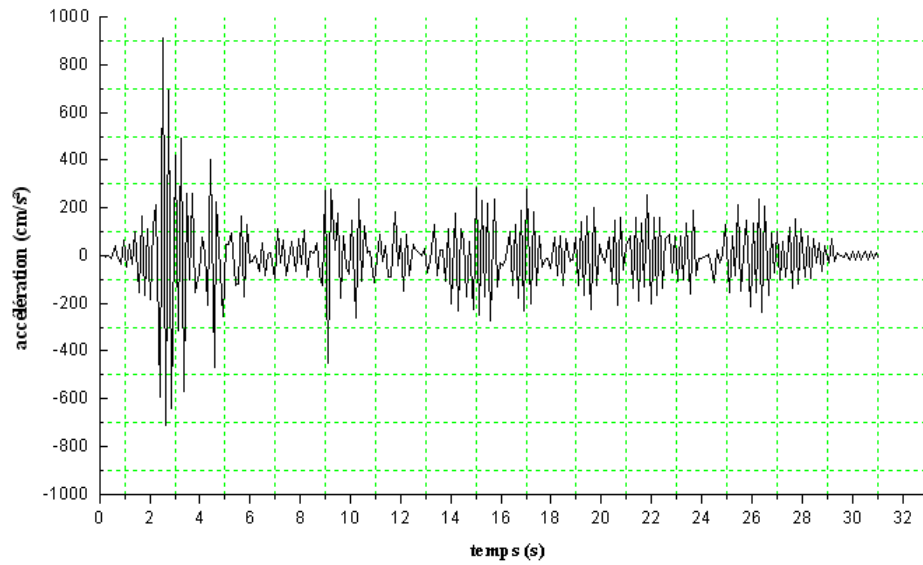


Figure V.1 : *modèle d'un portique sans amortisseur*

A. Déplacement :**Graphe V.1 :** *déplacement du portique sans amortisseur***B. Vitesse :****Graphe V.2 :** *vitesse du portique sans amortisseur*

C. Accélération :**Graphe V.3 :** *accélération du portique sans amortisseur***Tableau V.1 :** *tableau récapitulatif du model 1 (portique sans amortisseur)*

	valeurs
Déplacement maximal (cm)	1.62
Vitesse maximale (cm/s)	28.26
Accélération maximale (cm/s²)	914.55

V.3.1.2. Portique avec amortisseur

Dans ce cas, le portique plan, soumis au séisme d'El Centro a été pourvu d'un amortisseur disposé en diagonale. Nous avons fait un choix délibéré des caractéristiques de cet amortisseur $C= 100 \text{ KN/m/s}$ et $\alpha=0.5$

Les digrammes des accélérations, des vitesses et des déplacements ainsi obtenus sont représentés par des graphes. La comparaison entre les résultats obtenus pour le cas de portique sans amortisseur et le cas de portique avec amortisseur est présentée sous forme graphique et tabulée.

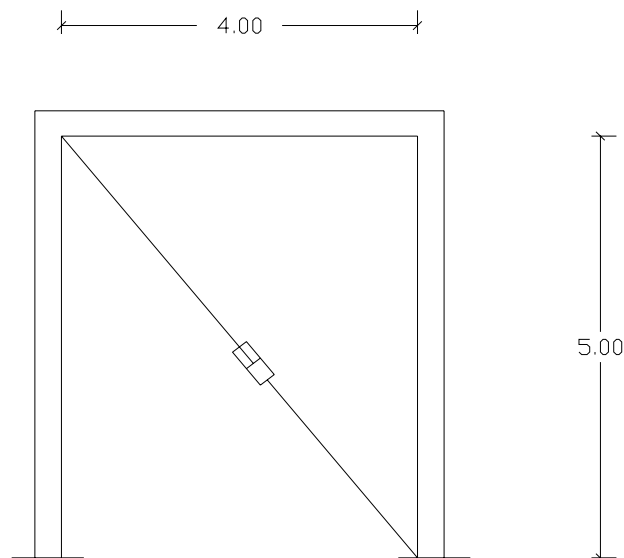
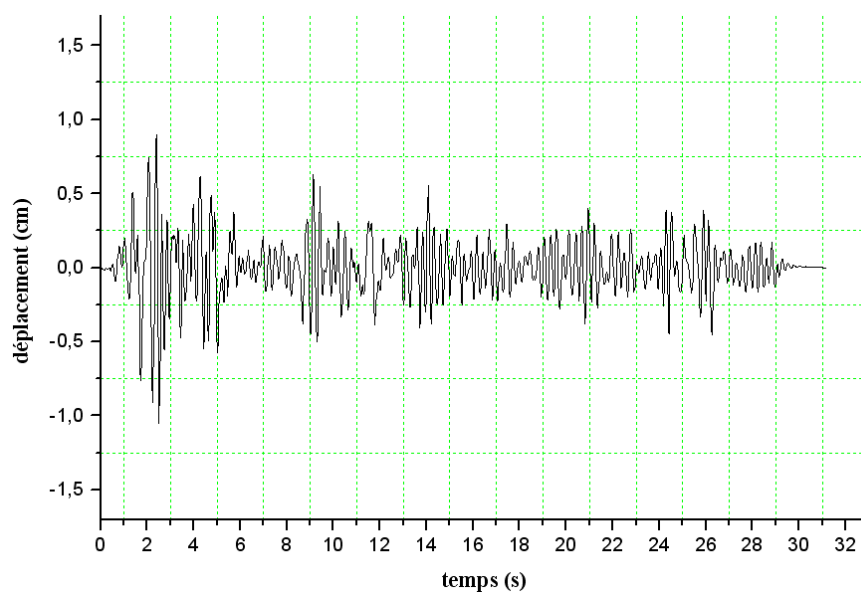
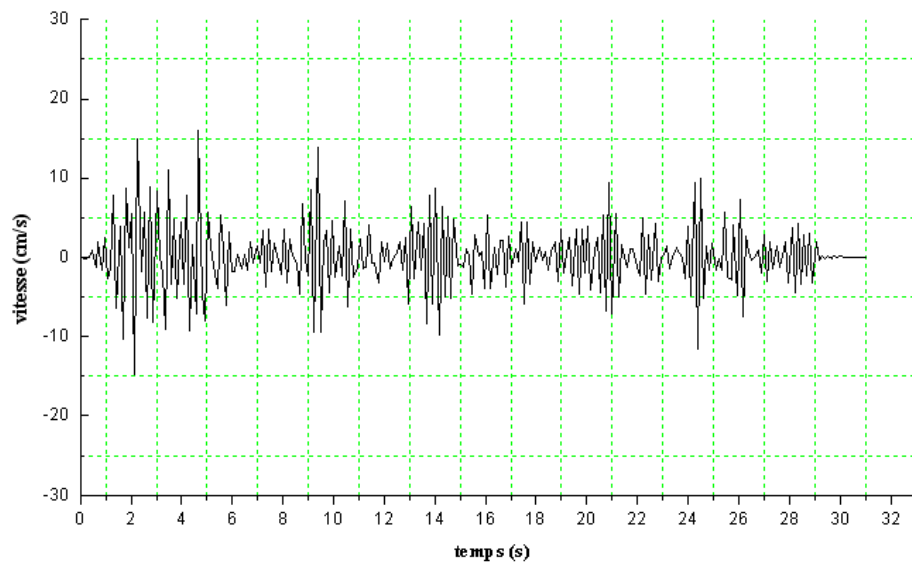
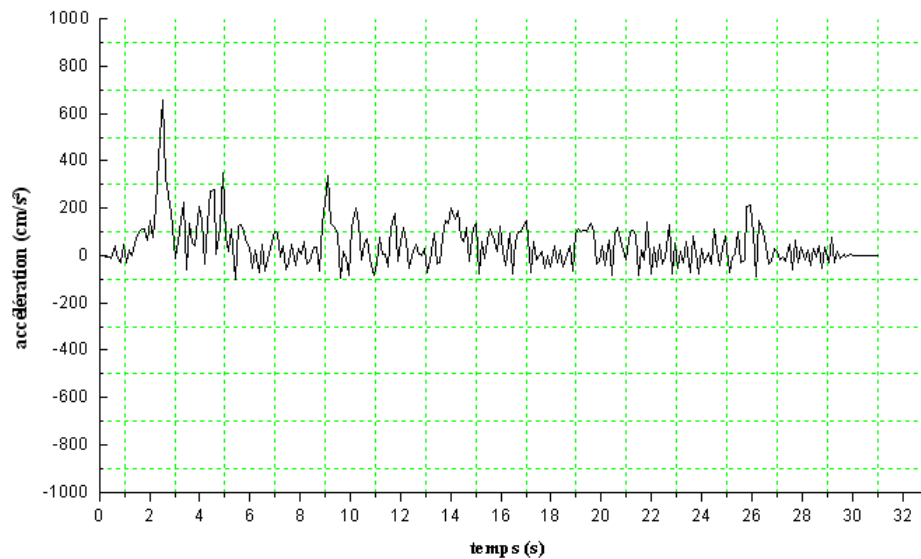


Figure V.2 : modèle d'un portique avec amortisseur

A. Déplacement

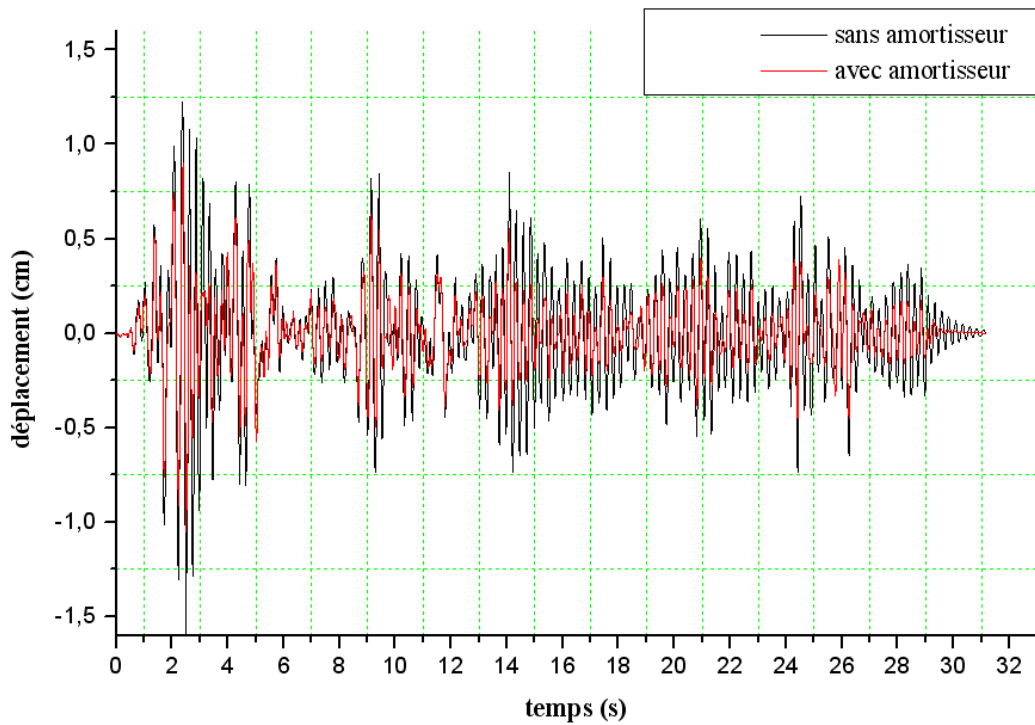


Graphe V.4 : déplacement du portique avec amortisseur

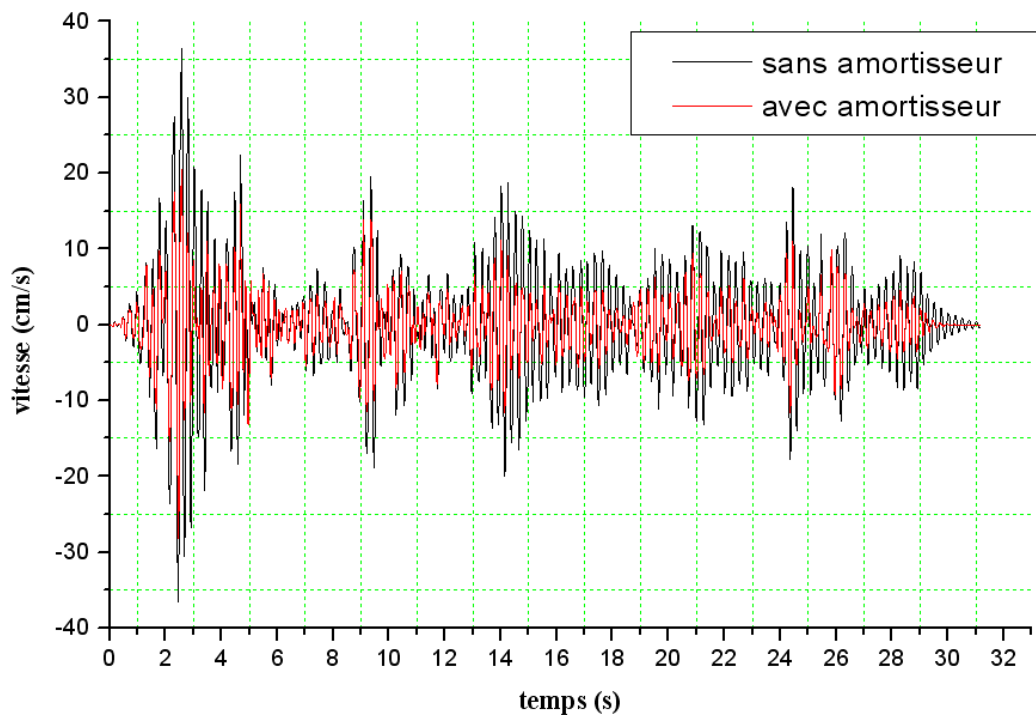
B. Vitesse**Graphe V.5 : vitesse du portique avec amortisseur****C. Accélération****Graphe V.6 : accélération du portique avec amortisseur****Tableau V.2 : tableau récapitulatif du model 1 (portique avec amortisseur)**

	valeurs
Déplacement maximal (cm)	1.05
Vitesse maximale (cm/s)	15.71
Accélération maximale (cm/s²)	654.47

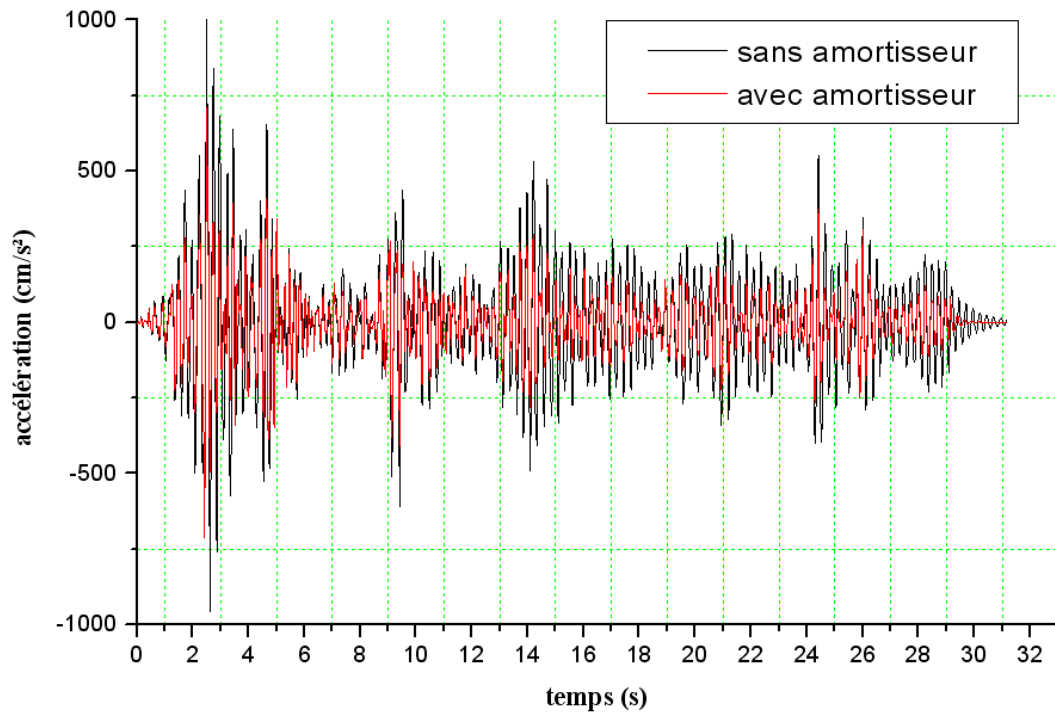
V.3.1.3. Comparaison des valeurs du déplacement, vitesse et accélération entre portique sans et avec amortisseur :



Graphe V.7 : comparaison des déplacements du portique avec ou sans amortisseur



Graphe V.8 : comparaison des vitesses du portique avec ou sans amortisseur



Graph V.9 : comparaison des accélérations du portique avec ou sans amortisseur

Tableau V.3 : tableau récapitulatif de comparaison du portique avec ou sans amortisseur

	Modèle1 (sans amortisseur)	Modèle 2 (avec amortisseur)	pourcentage de gain
Déplacement maximal (cm)	1.62	1.05	35.18 %
Vitesse maximale (cm/s)	28.26	15.71	44.40 %
Accélération maximale (cm/s²)	914.55	654.47	28.44 %

V.3.2. Cas d'un pont

Les ponts constituent généralement des ouvrages de grande importance et de grande ampleur, le maintien de leur fonctionnalité après un quelconque séisme est absolument vital pour garantir la continuité et la fluidité de la circulation des secours aux endroits sinistrés.

C'est pourquoi nous nous intéressons à l'analyse de ce type d'ouvrages. Cette analyse a pour objet de déterminer les réponses de la structure (déplacements, vitesses et accélérations) supposées soumise au séisme référentiel d'El Centro. A titre de comparaison, nous considérons deux variantes pont avec appareil d'appuis et pont avec appareils d'appuis et amortisseurs.

Pour ce cas, nous commençons d'abord par la modélisation de la structure du pont puis nous procédons à son analyse pour déterminer graphiquement les réponses : déplacements, vitesses et accélérations, leurs valeurs maximales seront données dans le tableau récapitulatif.

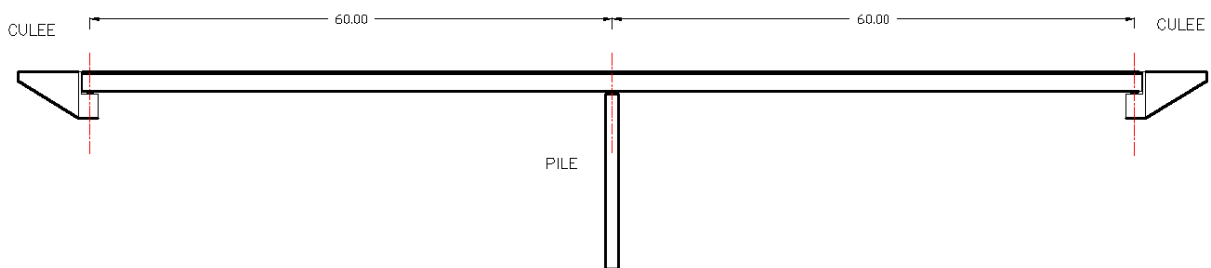


Figure V.3 : *modèle d'un pont en élévation*

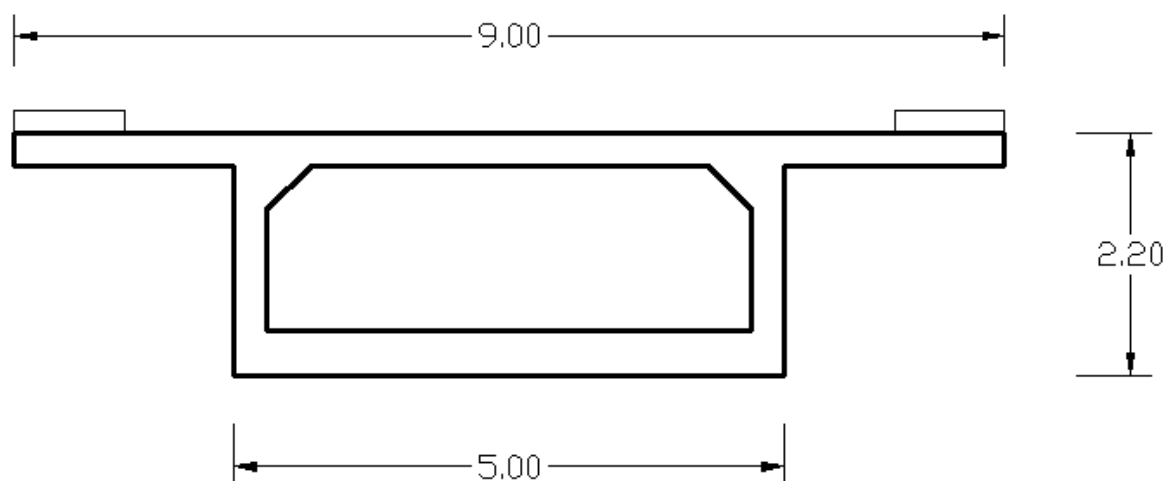


Figure V.4 : *section transversale du pont*

Pour monter l'influence des conditions d'appuis sur les ponts nous avons proposé plusieurs variantes :

- pont sans amortisseurs

Nous distinguons dans cette variante quatre sous variantes :

- 1- pont avec des appareils d'appuis fixes.
- 2- pont avec des appareils d'appuis en élastomère frété.
- 3- Pont avec des appareils d'appuis en élastomère frété sur la pile et glissant sur les culées
- 4- Pont avec des appareils d'appuis glissants

- pont avec amortisseurs

Nous distinguons dans cette variante deux variantes :

- 1- pont avec amortisseurs et appareils d'appuis glissants sur les culées et en élastomère frété sur la pile.
- 2- pont avec amortisseurs et appareils d'appuis glissants sur les culées et la pile.

V.3.2. 1. Pont sans amortisseurs

A. pont avec appareils d'appuis fixes

Ce type d'appuis est à éviter à cause de l'énergie sismique qui est totalement absorbé par l'ouvrage ($T = 0.0955$ s) et de l'effet thermiques dont il faut tenir compte.

Avantage :

- Déplacement négligeable.

Inconvénients :

- Efforts thermiques à prendre en compte
- Énergie sismique importante ($T = 0.0955$ s)

B. pont avec appareils d'appuis en élastomère frété

Ce type de conditions d'appuis est couramment utilisé pour les ouvrages courants à cause de leur efficacité sismique (isolateur sismique).

Avantage :

- Absorption de l'effet thermique.
- Déplacement tolérable pour les ouvrages courants
- Énergie sismique moyennement importante ($T = 0.9645$ s)

Inconvenant :

- Limitation de l'utilisation aux les ouvrages courants

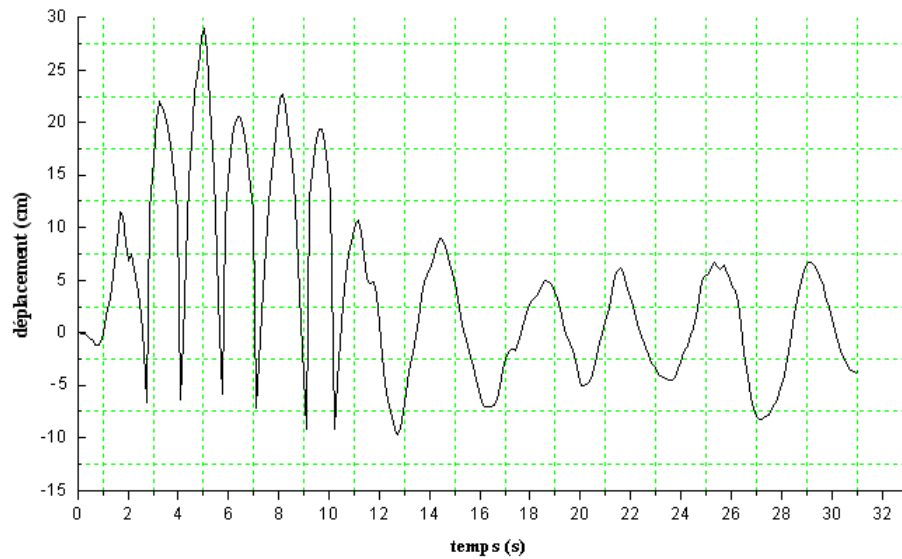
C. Pont avec appareils d'appuis en élastomère frété sur la pile et glissants sur les culées**Avantage :**

- Énergie sismique faible ($T = 3.4269$ s)

Inconvenant :

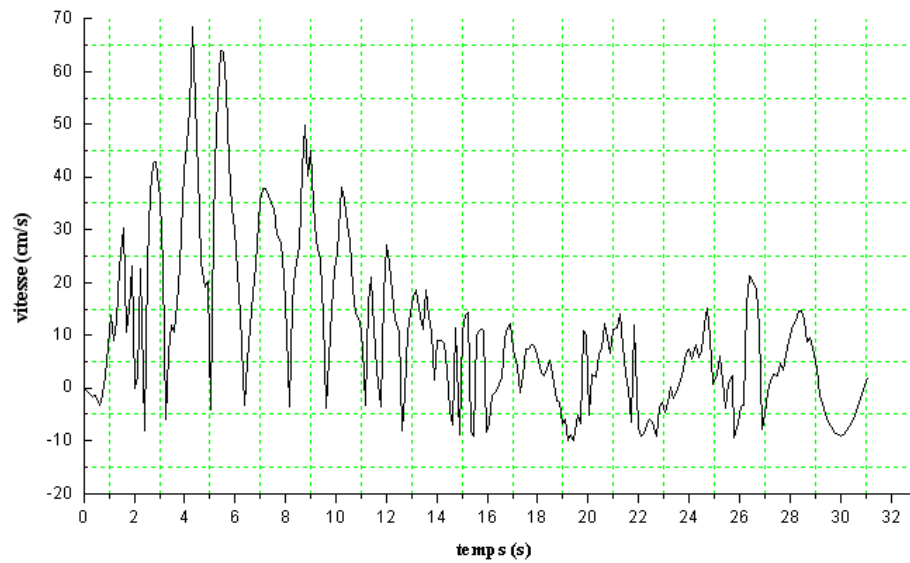
- Déplacement important

Les résultats concernant les déplacements, vitesses et accélérations sont représentés par les graphes suivants :

Déplacement

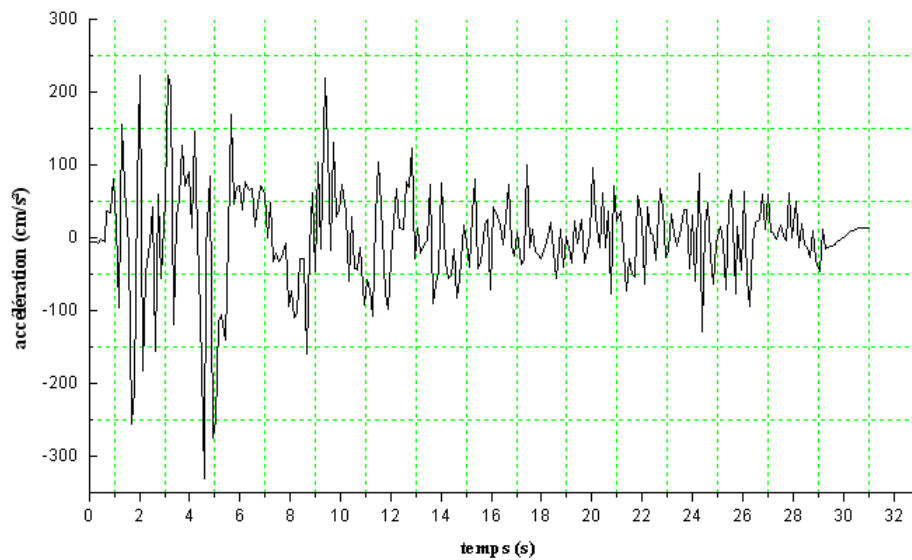
Graphe V.10 : déplacement du pont sans amortisseur

Vitesse



Graphe V.11: *vitesse du pont sans amortisseur*

Accélération



Graphe V.12 : *accélération du pont sans amortisseur*

Tableau V.4 : *Tableau récapitulatif du modèle pont sans amortisseur*

	valeurs
Déplacement maximal (cm)	29.05
Vitesse maximale (cm/s)	68.45
Accélération maximale (cm/s²)	331.1

D. Pont avec appareils d'appuis glissants :

Dans ce cas le tablier est totalement isolé des appuis du point de vue efforts. Ce cas est idéal, mais l'inconvénient ici est que les déplacements tendent vers l'infini ; ceci nous oblige à limiter ces déplacements par addition d'amortisseurs.

V.3.2. 2. Pont avec amortisseurs

Les caractéristiques de l'amortisseur pris en compte dans cette application sont : $C = 1000 \text{ KN/m/s}$
 $\alpha = 0.5$

V.3.2.2.1. pont avec amortisseurs et appareils d'appuis glissants sur les culées et en élastomère frété sur la pile.

Avantage :

Déplacement faible.

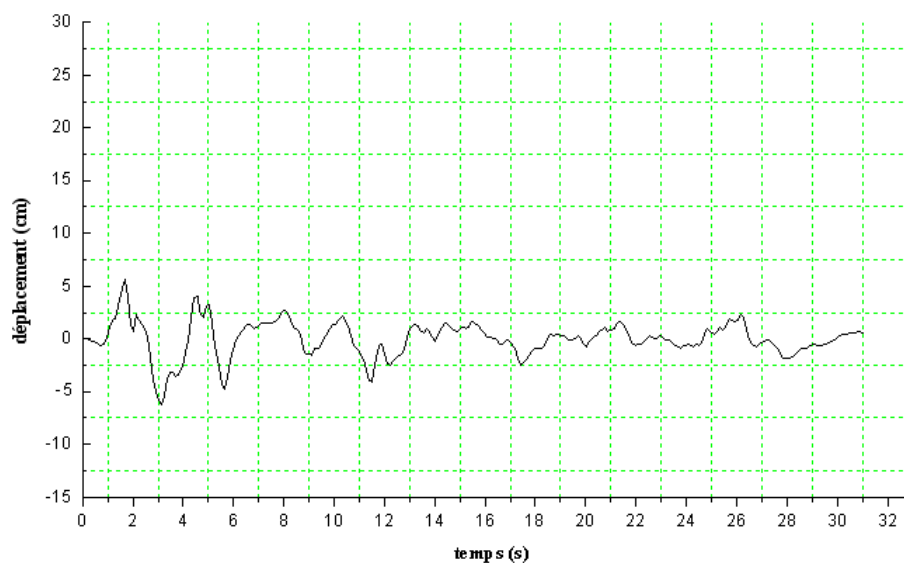
Énergie sismique faible ($T = 3.4269 \text{ s}$)

Inconvénient :

Coût et maintenance relativement élevés

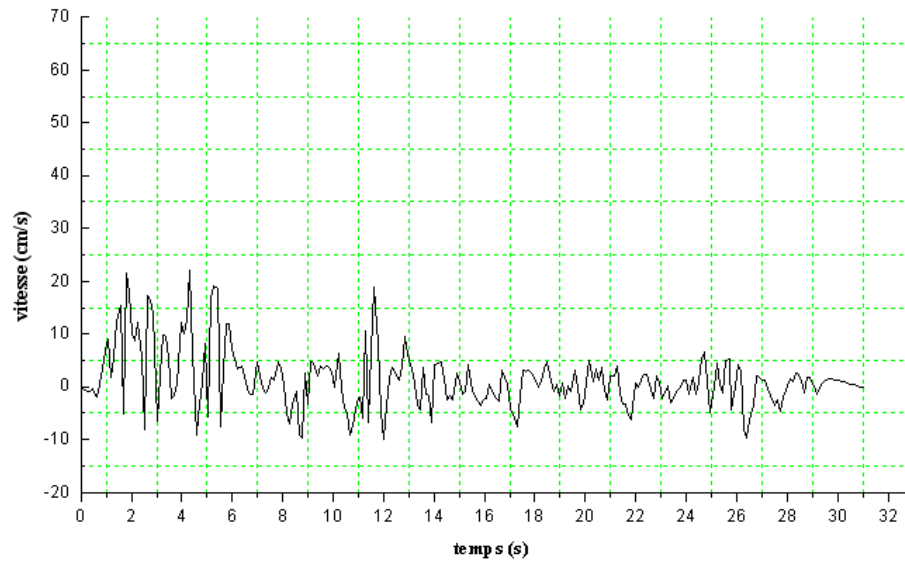
Les résultats trouvés de déplacement, vitesse et accélération sont représentés par les graphes suivants :

Déplacement



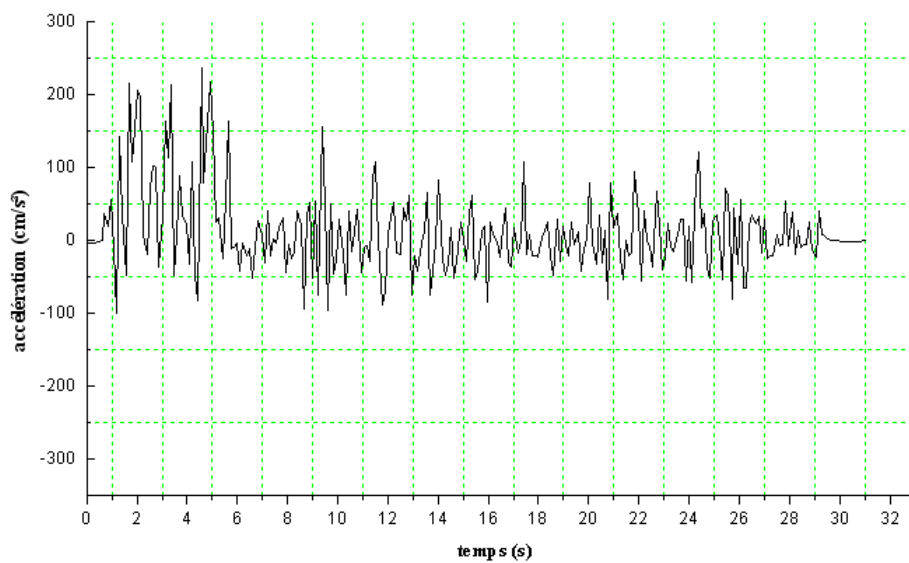
Graphe V.13 : déplacement du pont avec amortisseur

Vitesse



Graphe V.14: *vitesse du pont avec amortisseur*

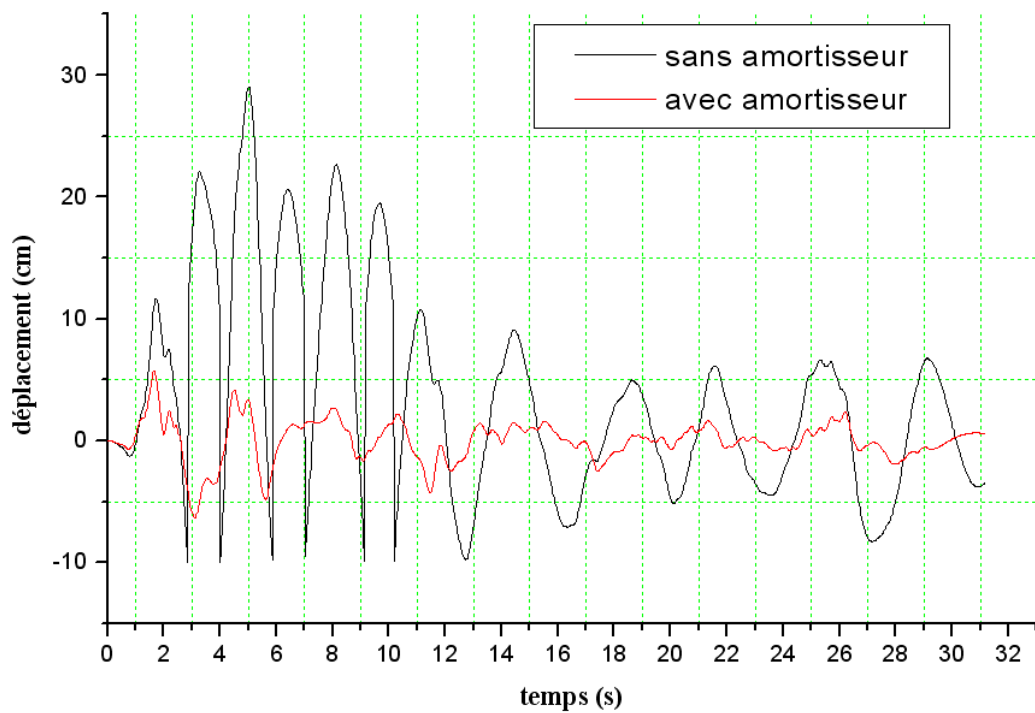
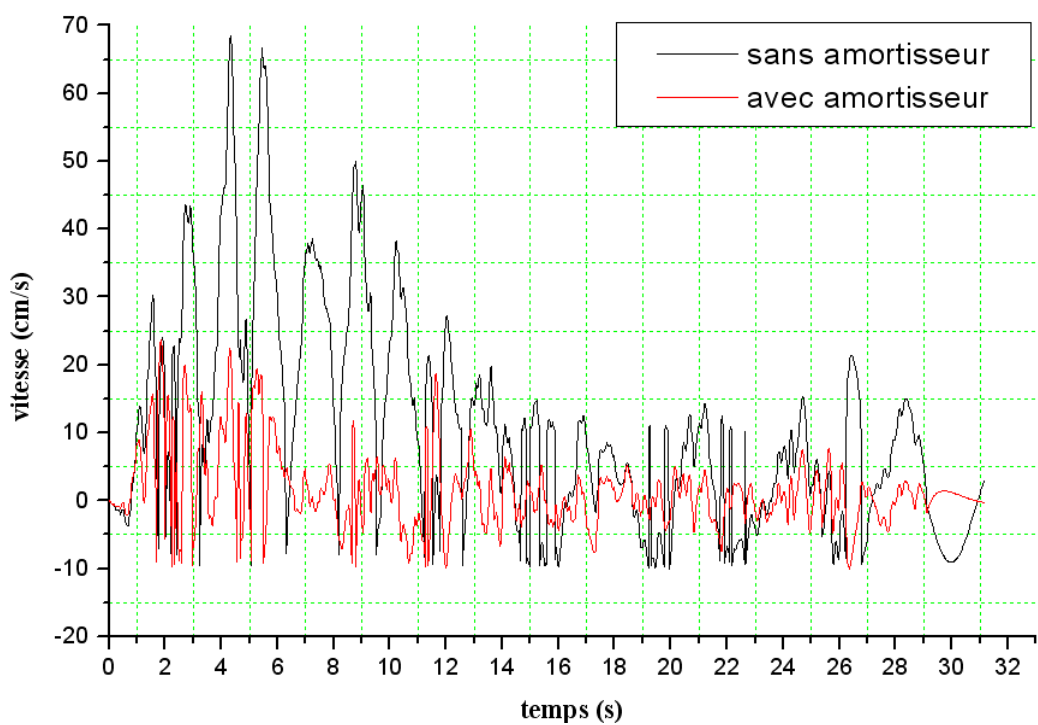
Accélération

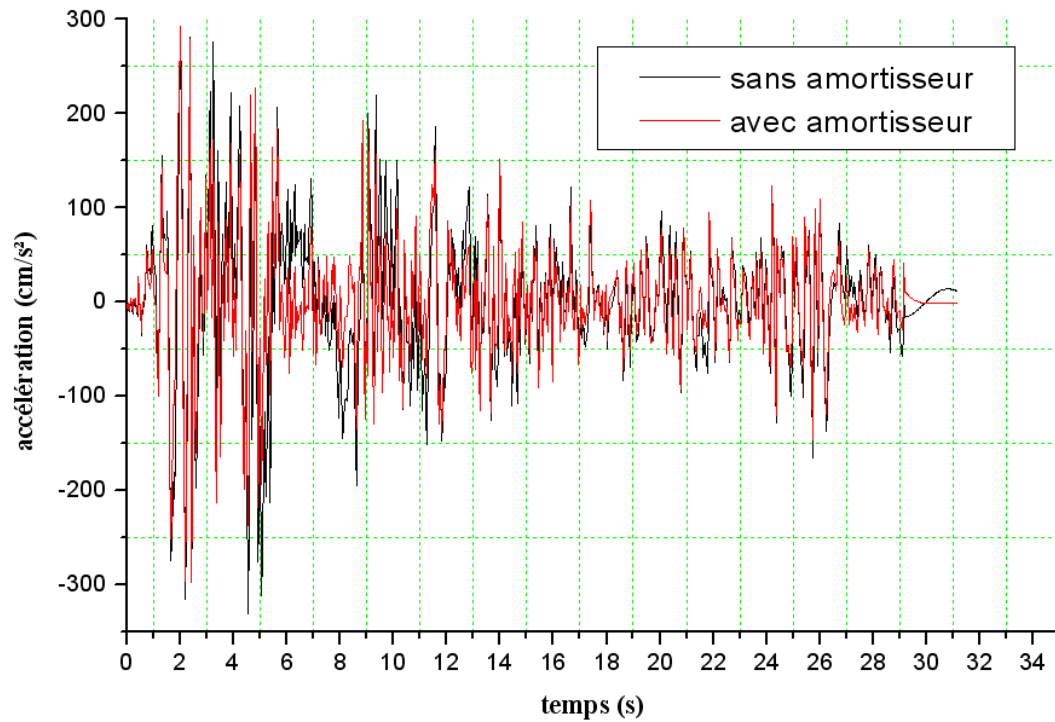


Graphe V.15 : *accélération du pont avec amortisseur*

Tableau V.5 : *Tableau récapitulatif du model pont avec amortisseur*

	valeurs
Déplacement maximal (cm)	6.31
Vitesse maximale (cm/s)	24.48
Accélération maximale (cm/s²)	298.2

V.3.2.3. Comparaison graphiques des réponses**Graphe V.16 :** comparaison des déplacements entre pont avec et sans amortisseur**Graphe V.17 :** comparaison des vitesses entre pont avec et sans amortisseur



Graphe V.18 : *comparaison des accélérations entre pont avec et sans amortisseur*

V.3.2.4. pont avec amortisseurs et appareils d'appuis glissants sur les culées et la pile (tablier totalement isolé)

Avantages :

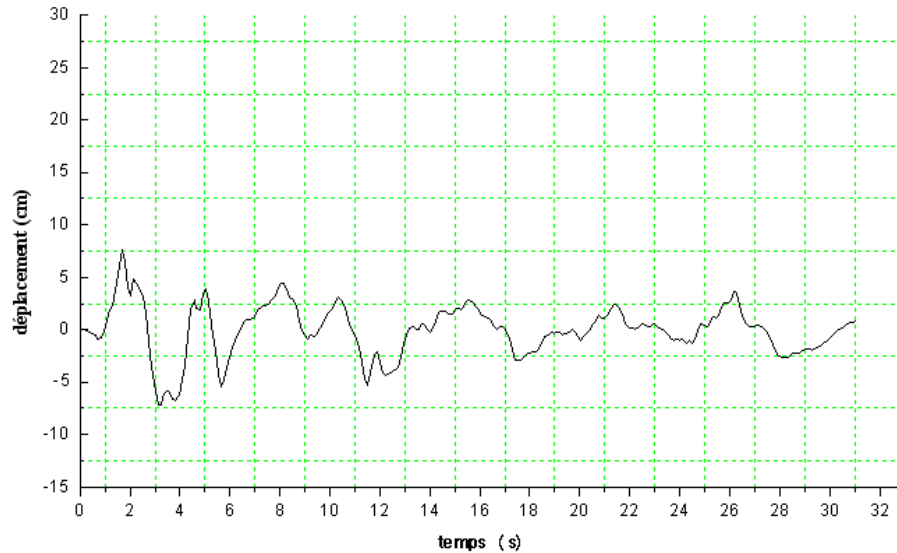
- Déplacement faible.
- Énergie sismique très faible ($T = 5.4110$ s)

Inconvenant :

- Coût et maintenance élevée

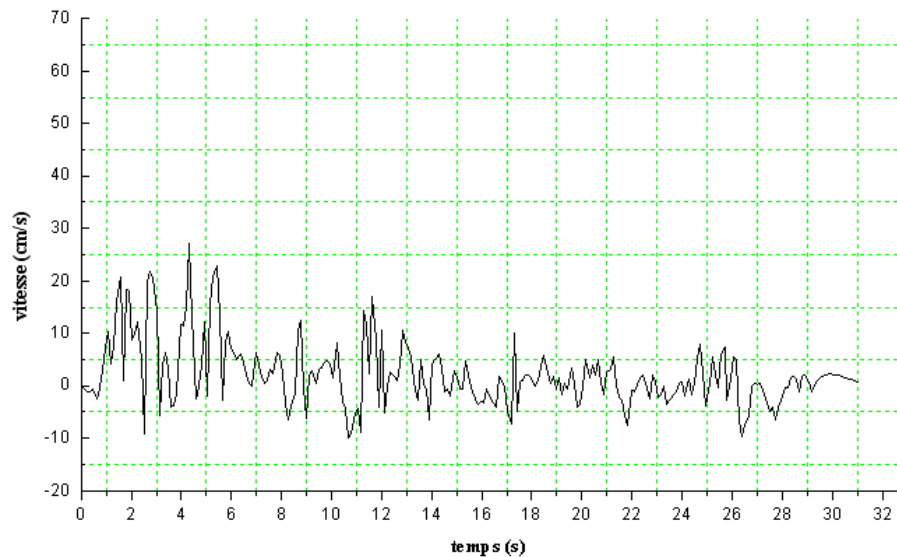
Les résultats trouvés des déplacement, vitesse et accélération sont représentés par les graphes suivants :

Déplacement



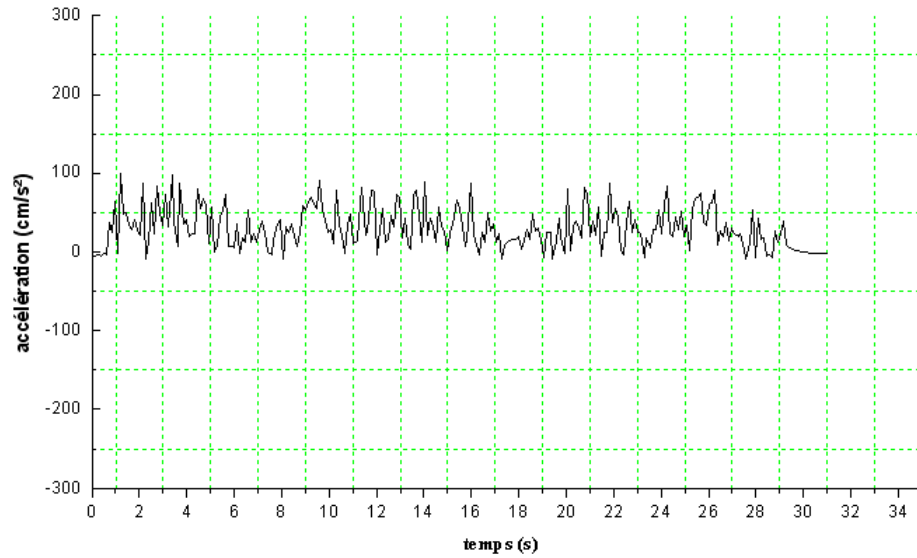
Grphe V.19 : *déplacement du pont avec appareils d'appuis glissant et un amortisseur*

Vitesse



Grphe V.20 : *vitesse du pont avec appareils d'appuis glissant et un amortisseur*

Accélération



Graphe V.21 : vitesse du pont avec appareils d'appuis glissants et un amortisseur

Tableau V.6 : Tableau récapitulatif du modèle pont avec appareils d'appuis glissants et un amortisseur

	valeurs
Déplacement maximal (cm)	7.63
Vitesse maximale (cm/s)	27.26
Accélération maximale (cm/s²)	300.03

Tableau V.7 : tableau récapitulatif de comparaison entre pont avec et sans amortisseur

	Pont pile fixe culées libres (sans amortisseur)	Pont à pile fixe et culées libres (avec amortisseur)	Pont avec Tablier libre (avec amortisseur)	gain (%)
Déplacement maximal (cm)	29.05	6.31	7.63	73.73
Vitesse maximale (cm/s)	68.45	24.48	27.26	60.17
Accélération maximale (cm/s²)	331.1	298.2	300.03	9.94
Période (s)	3.4269	3.4269	5.411	-

V.3.3. Interprétation des résultats

On constate après un cycle de mouvement une réduction dans un rapport égal à $1/3$ de la valeur des amplitudes des pics successifs, alors que sans amortisseur plusieurs pics sont mis en évidence, ce qui sollicite grandement les éléments résistants et altère fortement les appuis dans leur constitution

L'amortisseur fait chuter brutalement les réponses en épargnant les dispositifs isolateurs ainsi que les fixations

On remarque également que l'utilisation des amortisseurs ne modifie pas la période de la structure. L'amortisseur est donc généralement associé à des isolateurs sismiques pour qu'ils se complètent mutuellement. Les isolateurs sismiques (appareils d'appuis en néoprène fretté) ont pour but d'augmenter la période, ce qui engendre des déplacements importants.

Pour cela, l'utilisation des appareils d'appuis glissants réalise l'isolement total de la structure (sauf frottement entre les plaques de glissement) mais engendre des déplacements très importants. Le système le plus efficace est donc celui qui incorpore des appareils glissants pour rendre libre ou isoler sismiquement la structure (c.à.d que la période devient très grande) en association avec des amortisseurs pour gêner et enfin réduire les amplitudes du mouvement en s'y opposant par une force proportionnelle à sa vitesse.

V.4. Exemple de conception

V.4. 1. Cas d'un pont

Pour mieux faire valoir l'utilité des amortisseurs, les trois modèles de ponts sont analysés :

- Pont courant avec appareils d'appuis en néoprène,
- Pont avec appareils d'appuis glissants,
- Pont avec amortisseurs.

1- Modèle pont courant avec appareils d'appuis néoprène

Nous considérons ici que tous les appuis sont constitués d'appareils d'appuis en néoprène qui présentent une certaine rigidité dans le plan horizontal. Celle-ci sera modélisée par un système de ressort.

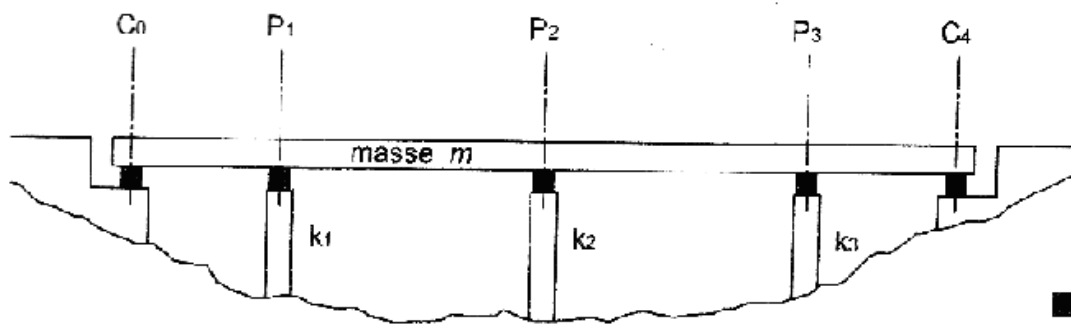


Figure V.5 : pont courant avec appareils d'appuis en néoprène

Le pont sera bien entendu dimensionné pour résister dans les deux situations : situation durable et transitoire et situation accidentelle.

Le modèle structurel sera représenté par la figure suivante :

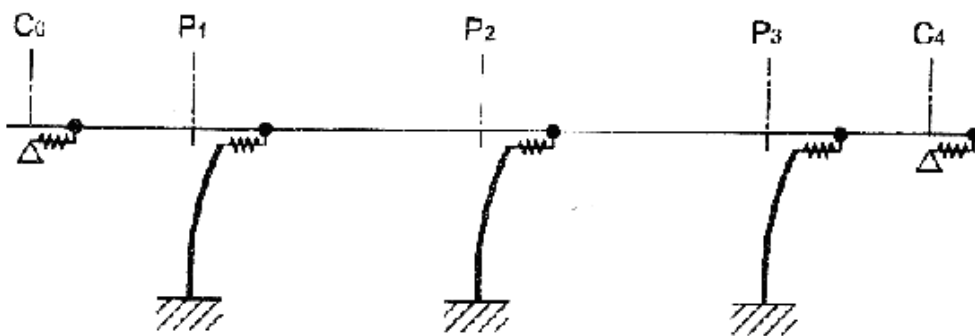


Figure V.6 : modèle d'un pont courant avec appareils d'appuis néoprène

a- Situation durable et transitoire :

Le déplacement horizontal est principalement dû dans ce cas aux effets thermiques et au freinage de véhicules.

b- situation accidentelle :

Dans ce cas, le déplacement est dû uniquement aux effets sismiques.

Calcul de la période fondamentale :

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Soit k la rigidité globale des piles $k = k_1 + k_2 + k_3$

Où $k_i = k_{i \text{ pile}} + k_{i \text{ appareil d'appuis}}$.

La période T_1 a été déterminée par la formule ci-dessus. Le spectre de réponse (FigV.9) permet de déterminer l'accélération sismique:

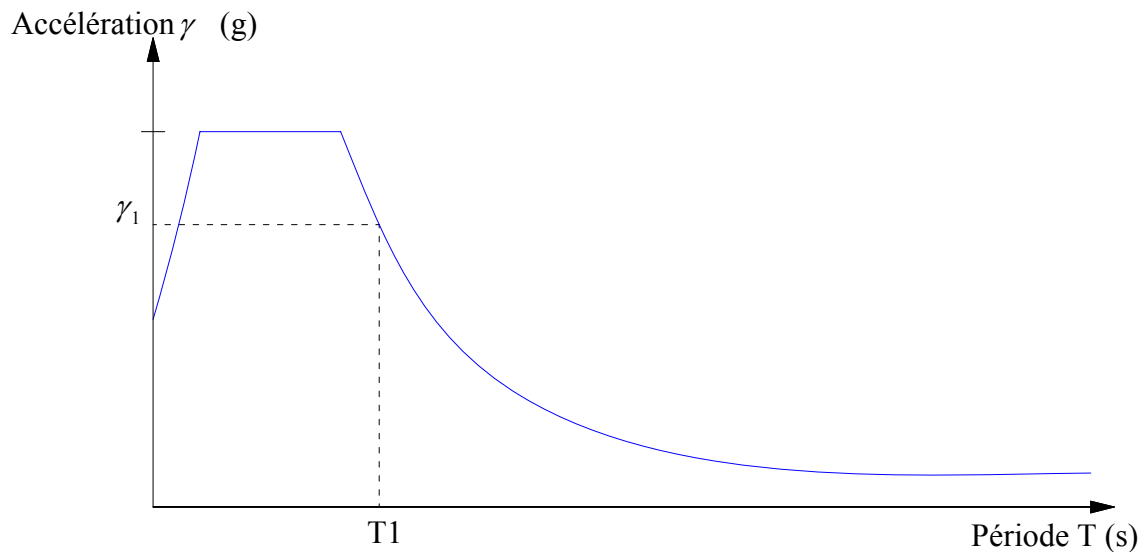


Figure V.9 : *spectre de réponse*

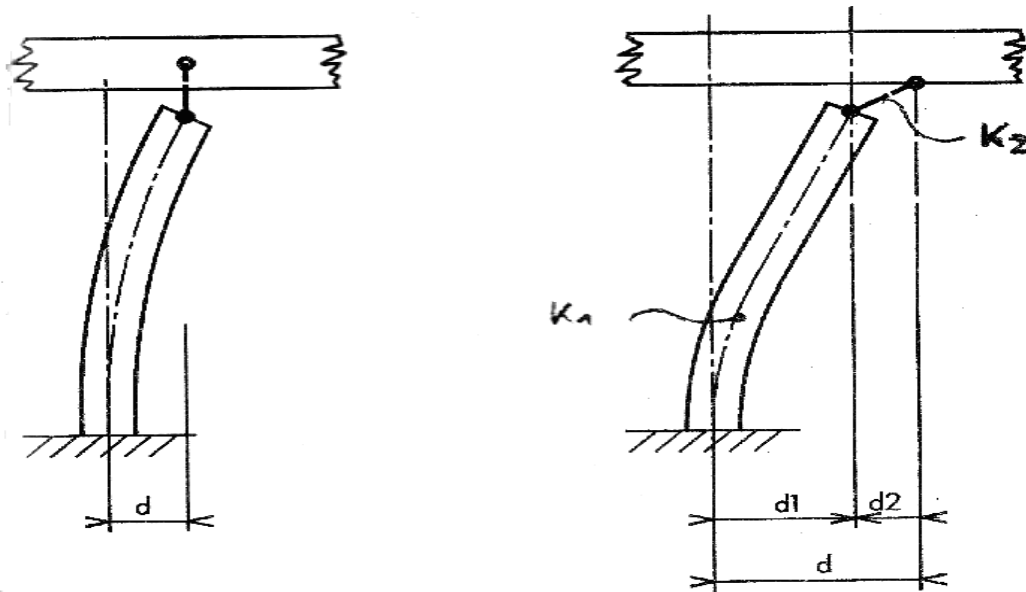


Figure V.10 : déformation de la pile

On remarque bien que la déformation de l'appui est composée de deux déplacements, le premier est celui de la déformation intrinsèque de la pile et le deuxième est la déformation de l'appareil d'appuis en élastomère fretté, qui donne une certaine souplesse à la pile et par conséquent diminution de l'effort sismique.

2- Modèle pont avec appareils d'appuis glissants

Nous considérons ici que tous les appuis sont constitués d'appareils d'appuis glissants sauf le deuxième appui qui est considéré fixe.

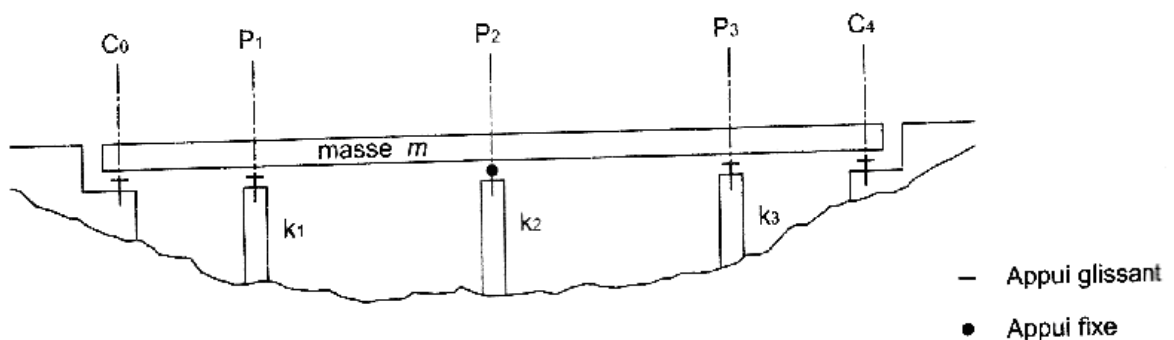


Figure V.11 : pont avec appareils d'appuis glissants

Le modèle structural sera représenté par la figure suivante :

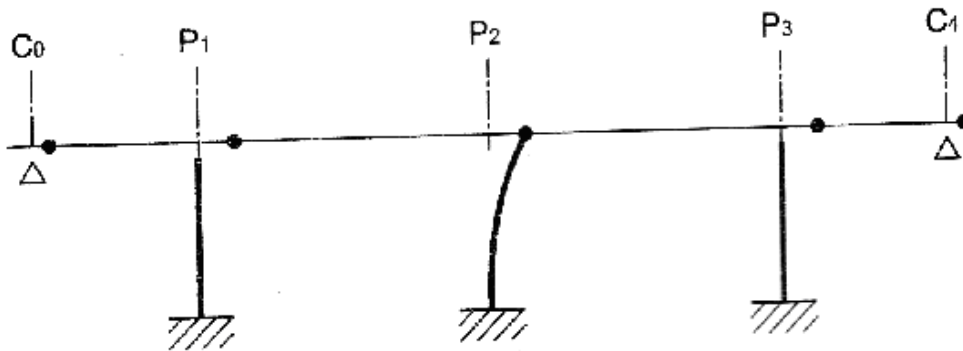


Figure V.12 : modèle de pont avec appareils d'appuis glissants

Calcul de la période fondamentale :

La période fondamentale est donnée par la formule suivante :

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_2}}$$

k_2 : rigidité de la pile P_2

La période T_2 étant évaluée, le spectre de réponse nous permet de déterminer l'accélération sismique γ_2 tel que le montre le schéma suivant :

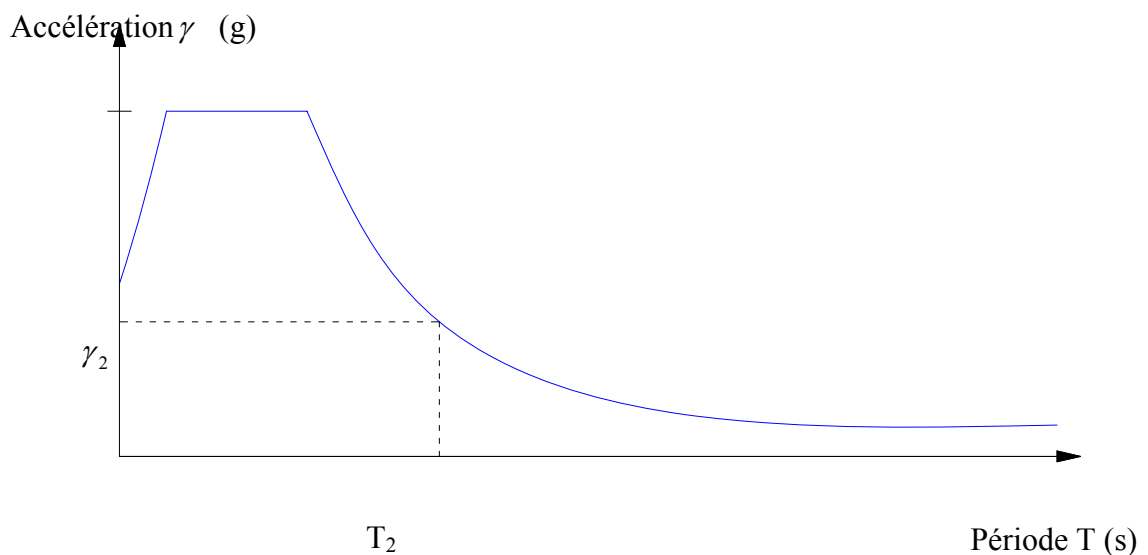


Figure V.15 : spectre de réponse

On remarque bien que l'accélération sismique γ_2 donnée par la période T_2 est plus faible que celle donnée par T_1 . Par voie de conséquence, l'effort sismique engendré sera moins important.

3- Modèle pont avec addition d'amortisseurs

Nous considérons ici que tous les appuis sont constitués d'appareils d'appuis glissants sauf pour le deuxième appui auquel on va associer un amortisseur.

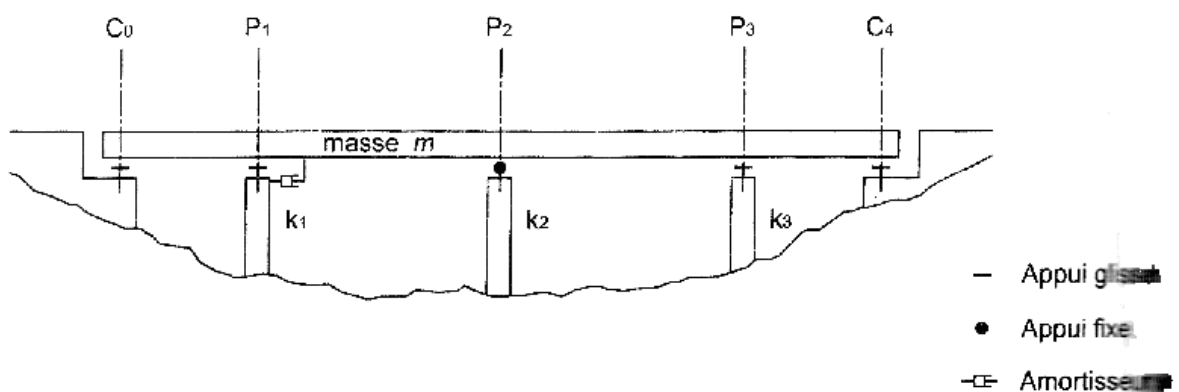


Figure V.16 : pont avec appareils d'appuis glissants et amortisseurs

Le modèle structural sera représenté par la figure suivante :

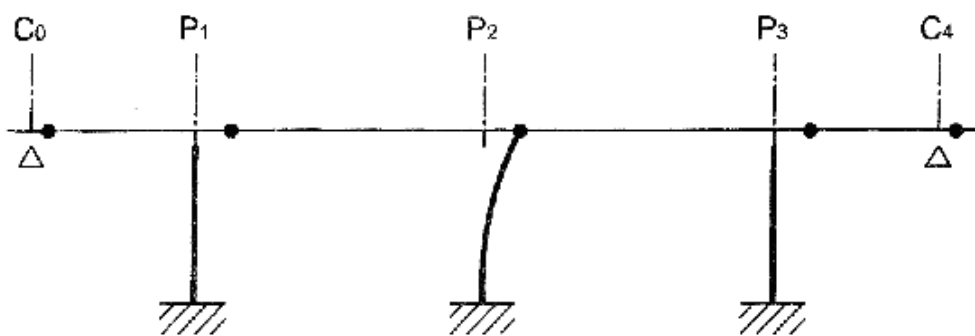


Figure V.17 : modèle d'un pont avec des appareils d'appuis glissants et des amortisseurs

La période fondamentale est obtenue par :

$$T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_2}} = T_2$$

k_2 : rigidité de la pile P_2

Le calcul de la période T_3 nous donne une valeur égale à T_2 , mais une accélération sismique γ_3 plus faible que γ_2 . Cela s'explique par le fait que l'addition d'un amortisseur n'influe pas sur la période de vibration d'une structure ; mais elle fait diminuer les sollicitations dynamiques par le biais de l'augmentation de l'amortissement [10].

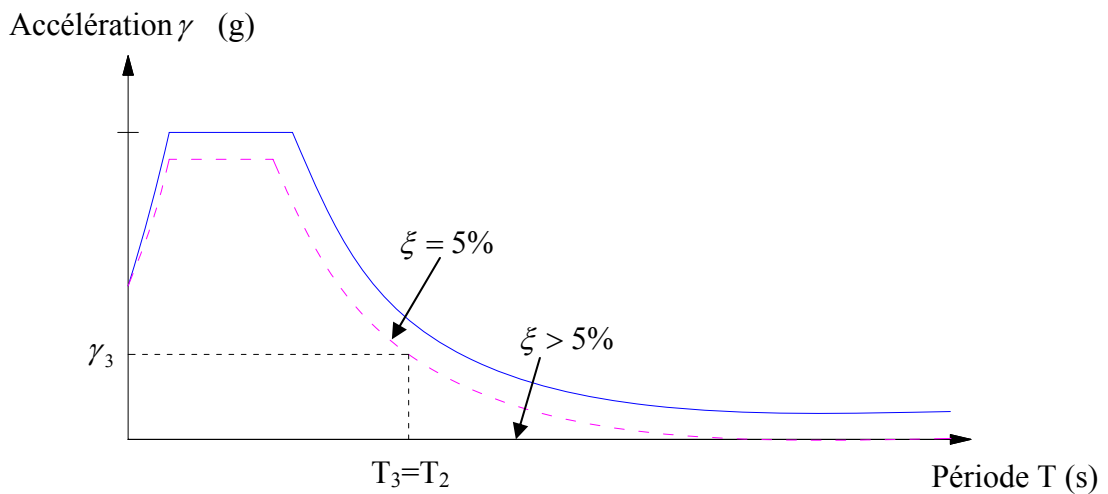


Figure V.20 : *spectre de réponse*

Le spectre de réponse suivant montre l'influence de l'addition des différents organes parasismiques et dispositifs d'amortissement sur l'effort sismique.

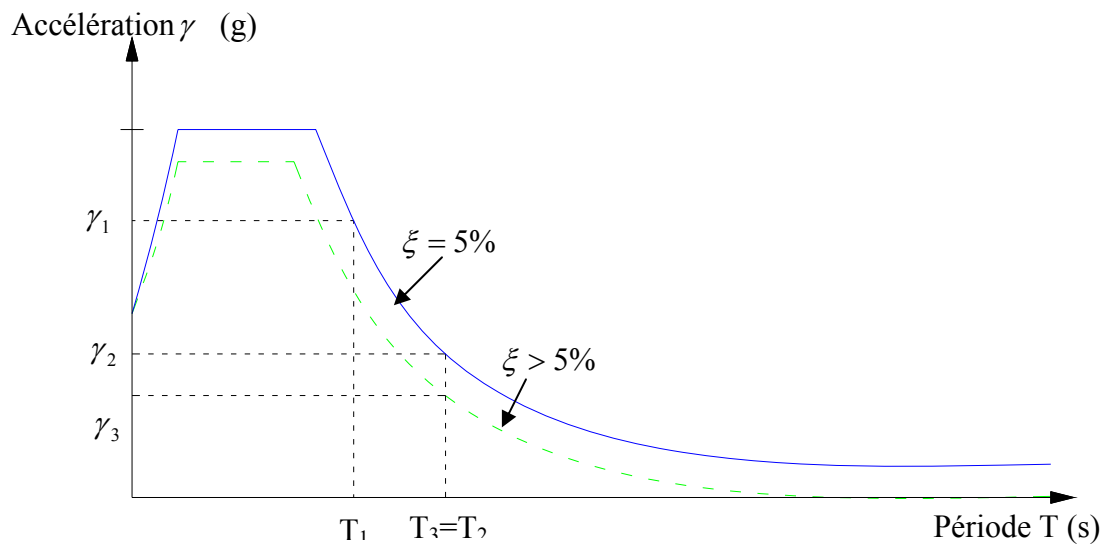


Figure V.21 : *comparaison des spectres de réponse*

V.4. 1.Cas d'un bâtiment

Cet exemple montre l'utilité de l'addition des différents organes parasismiques dans le domaine bâtiment.

La figure suivante retrace les différentes étapes du comportement de la structure d'un bâtiment supposée d'abord courante, puis munie progressivement d'organes parasismiques.

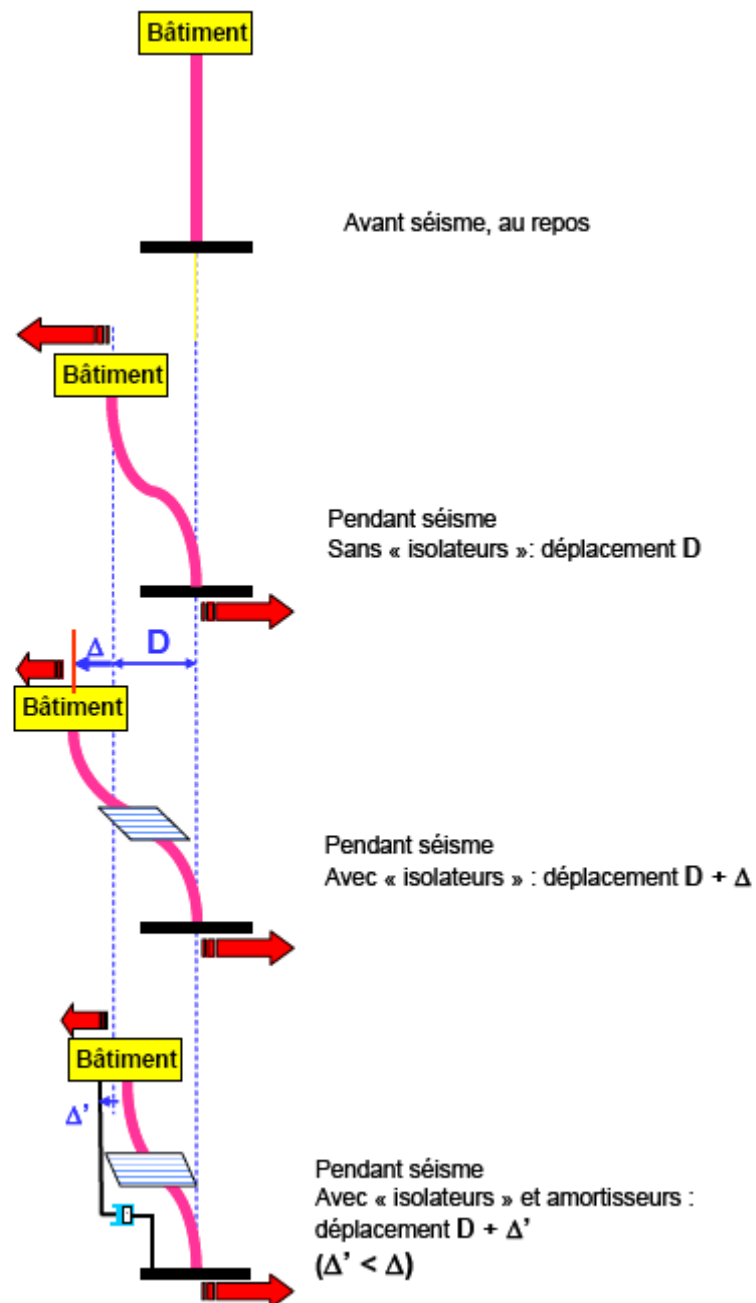


Figure V.22 : comportement structurel d'un bâtiment avant et après additions d'organes parasismiques

Commentaire

Pour mettre en évidence l'intérêt de combiner les différents systèmes de contrôle, nous allons mener un raisonnement virtuel qui retrace les états d'équilibre dans différentes situations.

Nous considérons tout d'abord que le bâtiment est au repos : le déplacement horizontal est donc nul. Nous supposons ensuite que ce même bâtiment est soumis à une excitation dynamique (séisme) qui provoque un déplacement horizontal D acceptable, mais engendrant des efforts assez importants. Pour les réduire, on incorpore dans la structure un système de contrôle passif du type isolateur sismique qui aura pour conséquence non seulement la réduction attendue des efforts mais aussi l'augmentation du déplacement horizontal parfois excessive et donc non souhaitable ou non admissible. Pour contrecarrer cet inconvénient nous devons combiner à cela un système de contrôle passif du type amortisseur. Cette dernière solution permet de réduire considérablement le déplacement horizontal et par voie de conséquence d'absorber l'énergie sismique. Il demeure comme même nécessaire d'évaluer les différents paramètres qui permettent la justification de la structure sous ces différents aspects.

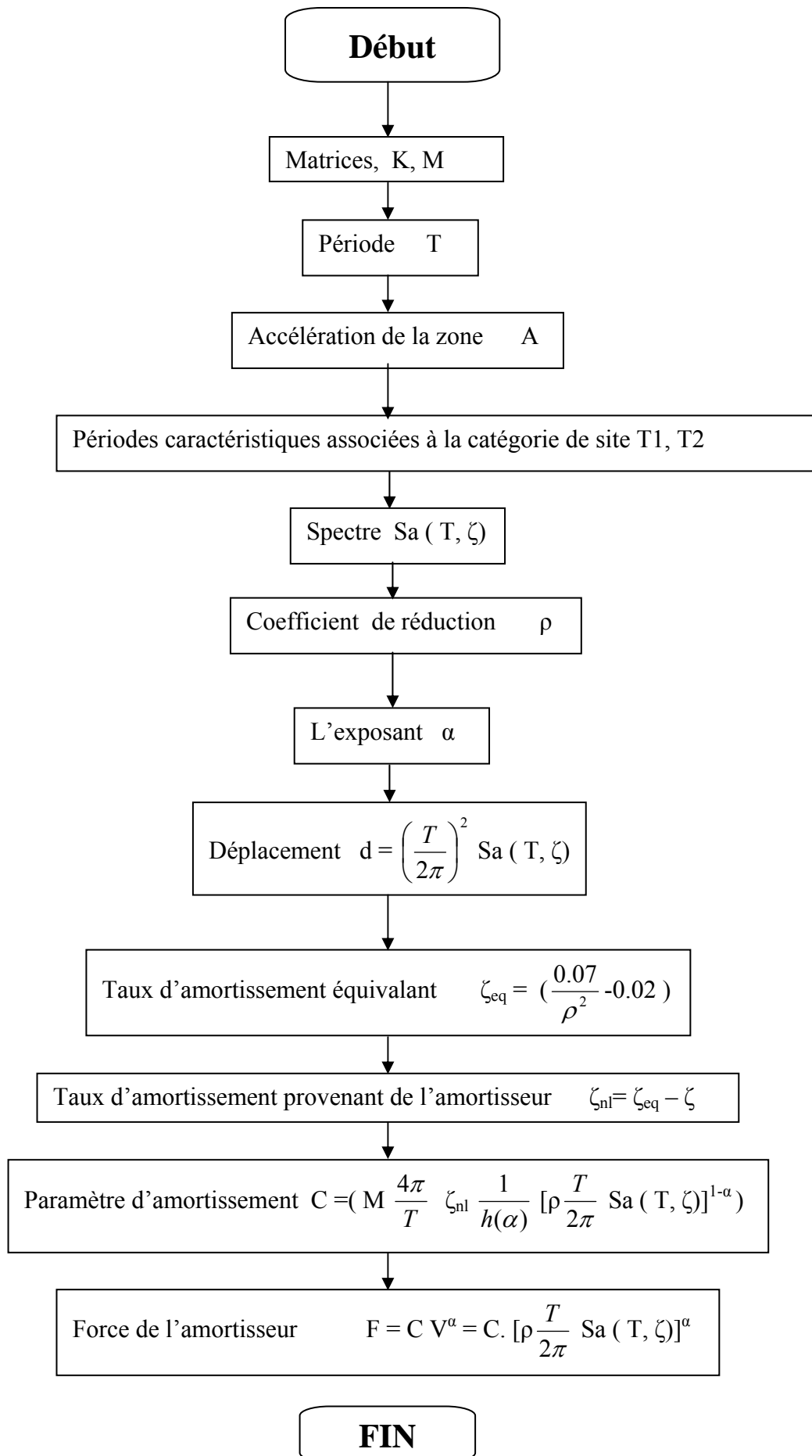
Une bonne conception structurale qui intègre l'addition des amortisseurs reste une opération très importante, mais pas très bien maîtrisée par les professionnels. Pour mener une telle étude parasismique, le critère économique nous interpelle et nous pousse à faire le dimensionnement de ces amortisseurs, qui tient compte des données réelles du projet. Les outils existants dans ce domaine ne permettent pas de dimensionner ces derniers sur la base d'un spectre de réponse. Ils considèrent des valeurs d'amortissement forfaitaire en pourcentage du poids selon la zone sismique. Nous nous proposons de combler ce vide moyennant l'élaboration d'un logiciel de dimensionnement des amortisseurs selon le règlement parasismique algérien en vigueur (RPA) .

V.5. Dimensionnement des amortisseurs visqueux non linéaire pour les ouvrages de génie civil

La partie théorique relative au dimensionnement des amortisseurs a été développée dans le chapitre III intitulé « formulation du problème d'amortissement et méthode de dimensionnement des amortisseurs »

Nous avons réalisé à cet effet un logiciel de dimensionnement des amortisseurs visqueux non linéaire que nous avons dénommé DAV2007 v1.0,

Les différentes étapes de dimensionnement sont représentées par l'organigramme suivant :



Exemple**Données**

Les données nécessaires à l'exécution de ce programme sont :

- Période $T = 0.90$ seconde
- Accélération de la zone $A = 0.4g$
- Masse du système $M = 82000$ kg
- Amortissement critique $\zeta = 5\%$
- T_1, T_2 périodes caractéristique associées a la catégorie de site
 - $T_1 = 0.15$ seconde
 - $T_2 = 0.40$ seconde
- Coefficient de réduction $\rho = 0.50$
- Exposant $\alpha = 0.60$

Résultats

Les résultats obtenus par ce programme sont

- Correction d'amortissement $\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \zeta}}$

$$h(\alpha) = 0.0892 \alpha^2 - 0.3583 \alpha + 1.2699$$

$$S_a(T, \zeta) = 1.25 A \left(1 + \frac{T}{T_1} (2.5 \eta - 1) \right) 9,81 \quad \text{si } 0 \leq T \leq T_1$$

$$S_a(T, \zeta) = 2.5 \eta (1.25 A) 9,81 \quad \text{si } T_1 < T \leq T_2$$

$$S_a(T, \zeta) = 2.5 \eta (1.25 A) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} 9,81 \quad \text{si } T_2 < T \leq 3 \text{ sec}$$

$$S_a(T, \zeta) = 2.5 \eta (1.25 A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3}{T} \right)^{\frac{5}{3}} 9,81 \quad \text{si } T > 3 \text{ sec}$$

- Déplacement $d = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 S_a(T, \zeta) / 100 = 14.661$ cm

- Taux d'amortissement équivalent $\zeta_{eq} = \left(\frac{0.07}{\rho^2} - 0.02 \right) 100 = 26\%$

Taux d'amortissement provenant de l'amortisseur $\zeta_{nl} = \zeta_{eq} - \zeta = 21\%$

- Paramètre d'amortissement $C = (M \frac{4\pi}{T} \zeta_{nl} \frac{1}{h(\alpha)} [\rho \frac{T}{2\pi} Sa(T, \zeta)]^{1-\alpha}) / 100 = 169.14 \text{ N} / (\text{m/s})^\alpha$

- Force de l'amortisseur $F = C V^\alpha = C \cdot [\rho \frac{T}{2\pi} Sa(T, \zeta)]^\alpha = 113.192 \text{ N}$

Interfaces du logiciel

a. Fenêtre d'introduction des données

Dans cette partie du déroulement de l'exécution du logiciel, les informations issues d'un calcul de la structure objet de l'étude, sont introduites comme des données de départ c'est-à-dire en input

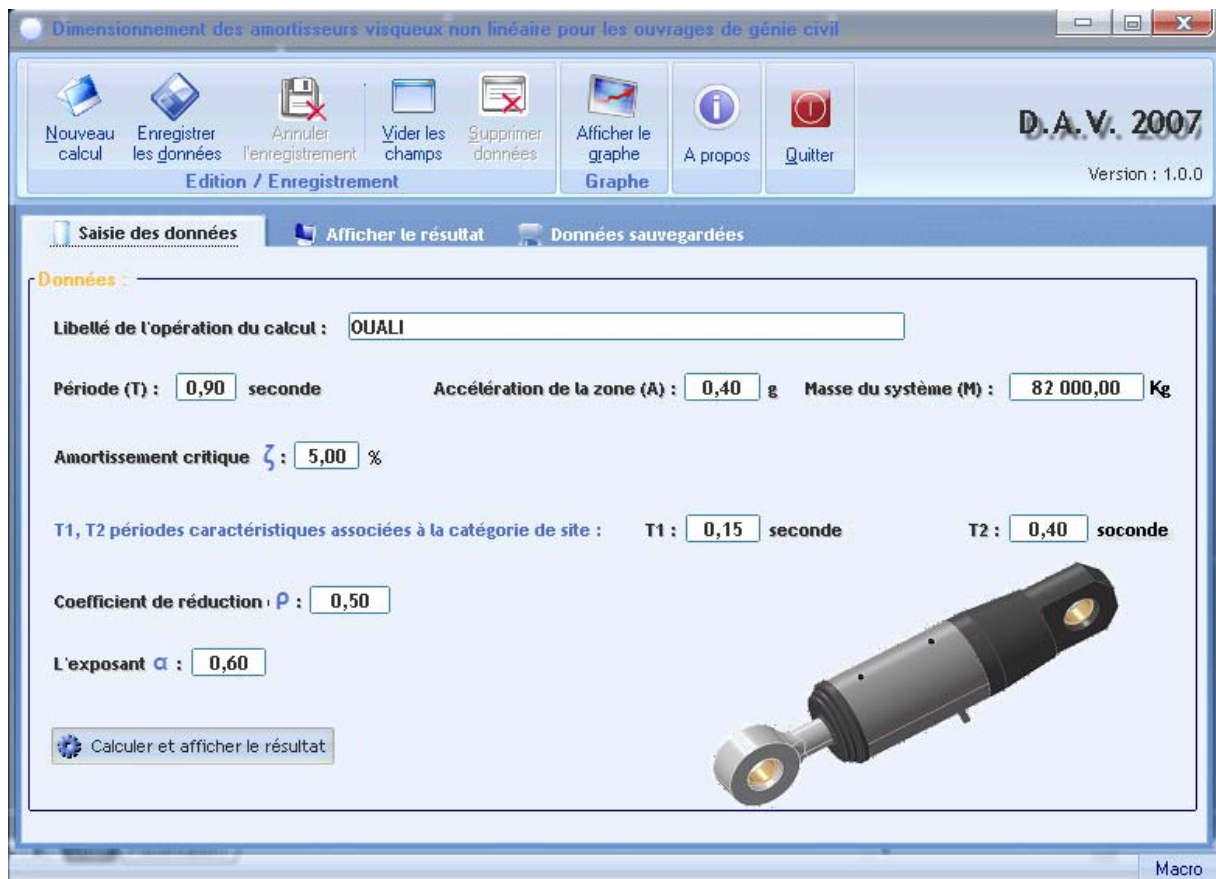


Figure V.23 : Fenêtre d'introduction des données

b. Fenêtre de résultats

Après un calcul comme explicité précédemment, les résultats sont données en valeurs numériques et enfin complétée par un graphe de fonctionnement de l'amortisseur



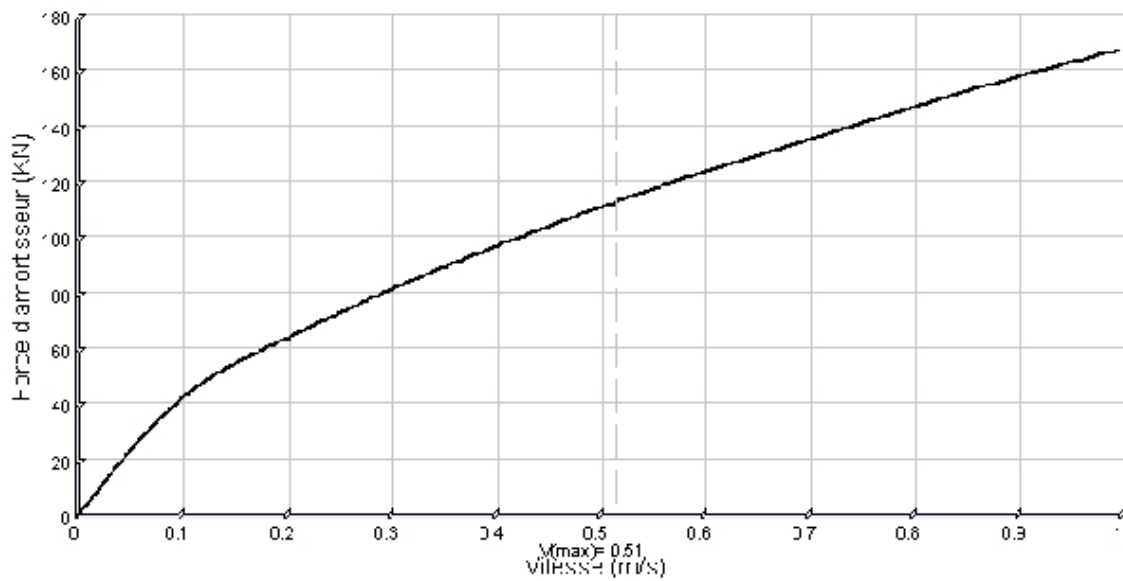
Figure V.24 : Fenêtre des résultats

c. Exemple illustratif : Fiche de données et de résultats

Les fichiers de données et de résultats peuvent être affichés et enregistrés en fichiers texte sous format .doc, comme le montre l'exemple suivant :

Dimensionnement des amortisseurs visqueux non linéaire pour les ouvrages de génie civil DAV 2007 selon RPA99/2003	
Libellé de l'opération du calcul : OUALI	
Données :	
Période (T) : = 0,90 seconde	Accélération de la zone (A) : = 0,40 g
Mass e du système (M) : = 82 000,00 kg	Amortissement critique ζ : = 5,0 %
T1, T2 périodes caractéristiques associées à la catégorie de site :	T1 : = 0,15 seconde T2 : = 0,40 seconde
Coefficient de réduction P : = 0,50	L'expos ant α : = 0,60
Résultat :	
Correction d'amortissement : $\eta = 1,000$	
$h(a) = 1,087$	
$Sa (T, \zeta) = 7,146 \text{ cm/s}^2$	
Déplacement : $d = 14,661 \text{ cm}$	
Taux d'amortissement équivalent : $\zeta_{eq} = 26,00 \%$	
Taux d'amortissement provenant de l'amortisseur : $\zeta_{nl} = \zeta_{eq} - \zeta = 21,00 \%$	
Paramètre d'amortisseur : $C = 169,14 \text{ KN / (m/s)}^{\alpha}$	
Force de l'amortisseur : $F = C V^{\alpha} = 113,19 \text{ KN}$	

Figure V.25 : Fichier données et résultats, relatif au calcul des paramètres de l'amortisseur



Graph V.1. Force de l'amortisseur en fonction de la vitesse.

Ce graphique représente la loi de comportement ainsi calculé ; Force de l'amortisseur en fonction de la vitesse et sert à la formulation d'une exigence de caractéristiques. Chaque amortisseur possède ses paramètres propres,

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le séisme est un phénomène naturel complexe qui se produit en différents moments et dans différents lieux dans le monde. Il engendre plusieurs victimes et il détruit beaucoup de biens. Malgré le progrès scientifique, on ne peut prévoir avec certitude ni où ni quand il peut se produire.

Les tremblements de terres reste donc un phénomène très aléatoire et leurs effets sont dévastateurs et incontournables. Il s'agit donc de réfléchir aux méthodes et aux moyens pour atténuer leurs impacts. Pour atteindre cet objectif qui constitue pour l'heure une part importante de leurs préoccupations, des chercheurs et des politiques tentent de trouver à ce problème des réponses rationnelles et optimales. Ce « raisonnement parasismique » doit s'étaler à toutes les phases du cycle de la vie d'un ouvrage, c'est-à-dire, depuis le début de sa conception, en passant par la phase de sa réalisation et en terminant par sa mise en service (entretien). Ceci se traduit par le fait qu'une attention particulière doit être portée sur la conception architecturale et structurale de l'ouvrage, et qu'il faut veiller au choix de la nature et de la qualité des matériaux de construction, au suivi régulier, voire même rigoureux des étapes de réalisation, et à la mise en place des services d'entretien compétents.

Notre travail se veut d'être une modeste contribution à ce vaste domaine du « parasismique ». Notre préoccupation était donc l'atténuation des effets sismiques moyennant l'incorporation des dispositifs d'amortissement (appuis et amortisseurs) à des structures de grandes dimensions. Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'effet de l'amortissement sur les paramètres ou réponses qui sont le déplacement, la vitesse et l'accélération des structures dont dépendent bien évidemment les sollicitations. Les études théoriques et les applications concernant cet axe sont très récentes, et quasi absentes à l'échelle nationale.

Nous avons ainsi réalisé dans un premier temps une prospection, une analyse et une synthèse des informations bibliographiques (données et connaissances) inhérentes au domaine étudié. La première étape de cette partie a porté sur les notions et les concepts relatifs à l'amortissement. Un classement de « l'amortissement » selon plusieurs critères a été fait. Des méthodes d'évaluation de l'amortissement ont été présentées et discutées.

La deuxième étape a été consacrée aux différentes techniques de l'isolation sismique parmi les quelles l'utilisation des amortisseurs.

La troisième étape a été réservée pour la formulation mathématique (construction du modèle) de l'équation de mouvement avec amortisseur.

Nous nous sommes intéressés dans un second temps à des applications pour mettre en évidence l'intérêt de l'addition à des structures des dispositifs d'amortissement. Pour ce faire, nous avons réalisé un programme informatique pour l'évaluation des réponses (déplacements) d'un oscillateur simple supposé soumis au séisme de référence d'El-Centro. Nous avons ainsi montré que les déplacements diminuent considérablement avec l'augmentation de l'amortissement.

Une deuxième application concernant un portique et un pont a été réalisée pour mettre en évidence l'influence de l'introduction des amortisseurs sur les réponses de ces structures. La comparaison des résultats relatifs à une structure munie d'un amortisseur et ceux de la même structure sans amortisseur a bien montré qu'il y a un gain important dans la quantité de mouvement (déplacements, vitesses et accélérations).

Nous avons dans le même ordre d'idées conçu et réalisé un programme informatique de dimensionnement des amortisseurs.

Comme conclusion, l'utilisation des amortisseurs et les techniques d'isolation sismique, surtout dans les constructions stratégiques (hôpital, bâtiment important, pont, etc.) peuvent contribuer d'une manière efficace à l'atténuation des sollicitations sismiques, et par voie de conséquence, à la réduction du risque sismique.

Les modèles de structures munies d'appareils d'amortissement ne sont pas encore pris en charge par les règlements et les codes Algérien (RPA, RPOA) Notant aussi l'absence des DTR concernant les aspects pratiques de ces dispositifs d'amortissement. Il est temps d'y réfléchir sérieusement à ce problème afin d'intégrer cette nouvelle composante technologique tant sur le plan conceptuel, théorique que pratique.

Perspectives

Il demeure comme perspective l'évaluation de l'impact économique dans le sens le plus large (coût matériel, coût de réalisation, coût d'entretien...) dû à l'intégration de ces dispositifs d'amortissement dans une structure. Autrement dit, il s'agit de procéder à une étude technico-économique comparative entre une structure munie de dispositifs d'amortissement et la solution équivalente sans dispositifs.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. **SANAUL (hyq chonwdhury)** - Damping characteristics of reinforced and partially prestressed concrete beams, Faculty of Engineering-GRIFFITH UNIVERSITY- GOLD COAST CAMPUS, 1999, 283P.
- [2]. **PECKER (Alain)**- Cour de dynamique des structures- ENPC Paris, 2004.
- [3]. **Zacek M**- Construire parasismique- Edition Parenthèses, (1996).
- [4]. **Ministre des travaux publics et services gouvernementaux** -Aléas sismiques, codes du bâtiment et options d'atténuation des risques pour les immeubles canadiens, N° du catalogue : D82-73/2002F-IN, gouvernement du Canada, (2001).
- [5]. **US Army Corps of Engineers (USACE)** -Sismic design for building- Engineering Division Directorate of Military Programs-washington-DC, (1998).
- [6]. **SETRA** -Pont courant en zone sismique guide de conception –janvier 2000, 140p
- [7] **Kelly J.M**-The implementation of base isolation in the United States, Proceedings of tenth world conference on Earthquake-Balkema, Rotterdam 1994, pp 6507-6514.
- [8]. **Kelly.J.m & Jose. A** –Optimum damping in base-isolated structures, Proceedings of tenth world conference on Earthquake Engineering-Madrid-1992.
- [9]. -**Trevor E Kelly** - “ In-structure damping and energy dissipation; design guidelines “ Holmes Consulting Group, New Zealand-(2001); www.holmesgroup.com
- [10]. **A.Capra & D Amir Mazaheri** -Séminaire sur les ponts en zone sismiques –Alger, juin 2006
- [11]. **A.Parvin** –The use of helical spring and fluid damper isolation systems for structures subjected to vertical ground acceleration, july 2001,12p
-

[12]. **M. Kahan**- Dimensionnement simplifié d'amortisseurs visqueux non linaires pour les ponts en zone sismique , Revue française de génie civil - SETRA 2000 pp35-55.

[13]. **MCM Cabinet Conseil (2003)**- '‘ Les appuis parasismiques en caoutchouc ’’, catalogue, journées scientifiques et techniques, Algérie.

[14]. **Ikhlef Boualem** -Mémoire de magister -Technique d'isolation sismique : analyse et comparaison des codes existants, USTHB 2005.
