

N° D'ORDRE : 02 / 2003 – M / G.C.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE.
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE

FACULTE DE GENIE CIVIL

T H E S E

PRESENTEE POUR L'OBTENTION DU GRADE

DE

M A G I S T E R

EN : **GENIE CIVIL**

SPECIALITE: **CONSTRUCTION**

PAR

O U A K L I A H M E D

SUJET :

**CONTROLE DE LA REPONSE SISMIQUE
DES STRUCTURES DE BATIMENTS
PAR DES AMORTISSEURS A FRICTION**

Soutenue le 18 Mai 2003 devant le jury de soutenance composé de :

Mr LARADI Nadir	Professeur (USTHB)	Président.
Mr CHELGHOU M Abdelkrim	Professeur (USTHB)	Directeur de thèse.
Mme KHARCHI Fetoum	Maître de conférences (USTHB)	Examinatrice.
Mr BOURAHLA Nouredine	Maître de conférences (U. BLIDA)	Examinateur.
Mr AFRA Hamid	Maître de recherche (CGS)	Examinateur.
Mr KHALED Omar	Chargé de cours (USTHB)	Examinateur.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE.

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE

FACULTE DE GENIE CIVIL

**CONTROLE DE LA REPONSE SISMIQUE
DES STRUCTURES DE BATIMENTS
PAR DES AMORTISSEURS A FRICTION**

Par
A. OUAKLI

ANNEE UNIVERSITAIRE 2002 / 2003

REMERCIEMENTS

L'auteur adresse ses remerciements au Docteur Chelghoum, Professeur à la Faculté de génie civil de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger pour avoir accepté aimablement d'être le promoteur et l'encadreur de cette thèse, pour ses encouragements et pour le soutien sans faille qu'il lui a fourni au cours de cette étude et bien au delà.

L'auteur salut avec déférence la mémoire du Docteur Teramoto, Chef de la division Structural Engineering du bureau d'études et d'ingénierie japonais Nikken Sekkei pour lui avoir permis d'assister, parfois de participer aux expériences et tests effectués au laboratoire de Sumitomo steel Company, ainsi que pour l'aide scientifique qu'il lui a fourni au cours du travail initial et préparatoire de cette étude.

Il remercie vivement tous les membres du jury de soutenance, particulièrement le professeur Laradi Nadhir et ceux exerçant aux seins de la faculté de génie civil de l'USTHB et de l'université de Blida.

ABSTRACT

ملخص

تتمثل هذه الدراسة في ضبط المعلومات حول المراقبة الهيكلية مع الحرص على المراقبة بواسطة مبددي الطاقة . تم التطرق هنا الى مبدد الطاقة بالاحتكاك بطريقة جافة قام به فريق من الباحثين اليابانيين. أن التجارب التحليلية التي أجريت في مخبر يباني و التي حضرها صاحب هذا البحث يكمن هدفها في تمييز المبدد بانفراد و في مجال ما . أن التركيبات التي أجريت ،التجهيزات المنصبة و برامج التحميل المطبقة خلال هذه التجارب و كذلك النتائج المحصل عليها و المباحثات المتعلقة بها كلها تجدونها في هذا البحث

لقد تم أيضا القيام بتطبيق حول عمارة ذات هيكل معدني حيث أدمجت فيه مبددات من النوع التجريبي و هذا بهدف مراقبة الإزاحة ما بين الطوابق . كما تم تقييم فعالية المبدد .لقد أظهرت النتائج انه بإمكان الحصول على تقليص معتبر للرد الزلزالي الخاص بهياكل العمارات في حالة ما إذا كانت هذه الخيرة مجهزة بمبددات ذات احتكاك .

ان هذا المبدد يشكل إذا طرفا مهما قد يؤخذ بعين الاعتبار في دراسة المباني الهامة التي تتطلب تحكما متزايدا في التصرف الزلزالي .

RESUME

La présente étude fait le point des connaissances sur le contrôle structural en mettant l'accent sur le contrôle par dissipateurs d'énergie. Un dissipateur d'énergie par frottement à sec, développé par une équipe de recherche japonaise, y est étudiée.

Les tests expérimentaux, qui se sont déroulés dans un laboratoire japonais et auxquels l'auteur a assistés, ont pour but de caractériser le dissipateur seul et en contexte. Les montages effectués, l'instrumentation installée et les programmes de chargements appliqués lors de ces tests ainsi que les résultats obtenus et les discussions y afférentes sont rapportés dans la présente thèse.

Une application, portant sur un bâtiment à structure métallique dans laquelle ont été incorporés des dissipateurs à frottement du type testé, dans le but de contrôler le déplacement relatif inter étages, a été effectuée. L'efficacité du dissipateur a été évaluée. Les résultats montrent qu'une réduction significative de la réponse sismique des structures de bâtiments peut être obtenue dans le cas où celles-ci sont équipées de dissipateurs à frottement.

Ce dissipateur constitue donc un parti intéressant, pouvant être pris en considération dans les études de bâtiments importants pour lesquels une maîtrise accrue du comportement sismique est nécessaire.

SUMMARY

The present study makes a state of knowledge on structural control in general and structural control by energy dissipaters in particular. An energy dissipater using dry friction, developed by a Japanese research team, is studied there.

The experimental tests, which were carried out in a Japanese laboratory and to which the author assisted, have for goal to characterize the dissipater, alone and in context. The experimental set up which were done, the instrumentation installed and the loading program applied during these tests as well as the results obtained and the related discussions are brought back in the present thesis.

An application, dealing with a building whose structure is a steel structure and in which were built-in the friction dissipaters, with an aim of controlling relative story displacement, was carried out. The effectiveness of the dissipater has been evaluated. The results show that a significant reduction of the seismic response of building structures provided with friction dissipaters can be obtained.

This dissipater thus constitutes an interesting party, being able to be taken into account at the time of the studies of significant buildings in which a high command of the seismic behaviour is required.

Mots clés : contrôle structural, dissipateur d'énergie, dissipateur d'énergie par frottement sec.

SOMMAIRE

	Page
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	
I. Effets des séismes et approches parasismiques	1
II. Objectifs du sujet	4
III. Organisation du rapport	5
CHAPITRE 2 : LE CONTROLE STRUCTURAL	
I. Introduction	7
II. Historique du contrôle structural	8
III. Enjeux du contrôle structural	9
IV. Classification des systèmes de contrôle	11
41. Terminologie	11
42. Classification	12
V. Contrôle actif	13
VI. Contrôle passif	15
VII. Dissipateurs d'énergie	16
71. Généralités	16
72. Mécanismes de dissipation	18
73. Classification des dissipateurs d'énergie	19
CHAPITRE 3 : LE FROTTEMENT	
I. Généralités	24
11. Frottement interne	24
12. Frottement externe	25
II. Types de frottement externe	25
21. Frottement à sec	25
22. Frottement visqueux	26
III. Frottement visqueux	26
31. Nature des forces de frottement visqueux	26
32. Détermination des forces de frottement visqueux	26
33. Application du frottement visqueux pour le contrôle sismique	28
IV. Frottement à sec	29
41. Introduction	29
42. Constatation expérimentale du frottement à sec	30
43. Caractères et nature des forces de frottement à sec	31
44. Mécanismes du frottement à sec	33
45. Détermination du coefficient de frottement de repos	34
46. Frottement de glissement	36
CHAPITRE 4 : CARACTERISTIQUES DU DISSIPATEUR ISOLE	
I. Généralités	41
II. Description et fonctionnement du dissipateur	42
21. Description et montage du dissipateur	42
22. Fonctionnement du dissipateur	44

III. Essais du dissipateur	45
31. Méthode d'essai	45
32. Programme d'essai	47
33. Résultats obtenus	47
34. Discussions des résultats obtenus	50
CHAPITRE 5 : CARACTERISATION DU DISSIPATEUR EN CONTEXTE	
I. Introduction	52
II. Montage de l'expérience	52
III. Programme de chargements	54
IV. Résultats obtenus	55
41. Résultats des test sous chargements statiques	55
42. Résultats des test sous chargements dynamiques	57
V. Discussions des résultats obtenus	58
CHAPITRE 6 : APPLICATION	
I. Introduction	60
II. Description du bâtiment	60
21. Configuration générale du bâtiment	60
22. Systèmes structuraux	62
23. Infrastructure	64
III. Analyse et dimensionnement de la structure	64
31. Généralités	64
32. Paramètres de calcul	64
33. Analyse de la structure	65
34. Dimensionnement de la structure	65
IV. Eléments de dimensionnement du dissipateur	67
41. Généralités	67
42. Etude paramétrique	67
43. Conclusions	72
V. Efficacité du système de dissipation	72
51. Généralités	72
52. Etude analytique	72
53. Résultats obtenus	74
CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	
I. Conclusions et recommandations	79
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	82

LISTE DES FIGURES

FIGURE	TITRE	PAGE
2.1	Schéma de principe du contrôle actif	14
2.2	Composants d'un système de contrôle	15
2.3	Dissipateur visqueux	18
2.4	Dispositif de flexion	20
2.5	Courbe caractéristique du dispositif de flexion	20
2.6	Modèle de Ramberg Osgood	20
2.7	Modèle élasto plastique	20
2.8	Dispositif de torsion	21
2.9	Dispositif à extrusion	22
2.10	Dispositif Pall	23
3.1	Force de frottement visqueux	27
3.2	Mur visqueux	29
3.3	Frottement statique	30
3.4	Mécanisme microscopique du frottement	34
3.5	Détermination expérimentale du coefficient de frottement	36
3.6	Force de glissement : cas général	37
3.7	Modèle de Coulomb	38
3.8	Modèle de la force de glissement	38
4.1	Schéma descriptif du dissipateur à frottement	43
4.2	Dissipateur sur banc d'essai	45
4.3	Variation de la force de frottement sous charge sinusoïdale	46
4.4	Choc dynamique	48
4.5	Effet de la vitesse de chargement sur la courbe caractéristique	48
4.6	Energie dissipée en fonction de la vitesse	49
4.7	Effet de la température sur la courbe caractéristique	49
4.8	Energie dissipée en fonction de la température	50
4.9	Modèle de courbe caractéristique adopté	51
5.1	Test du dissipateur en contexte	53
5.2	Stratégie d'installation	54
5.3	Courbe caractéristique du système sous charges statiques	56
5.4	Courbe caractéristique statique du dissipateur	56
5.5	Courbe caractéristique du système sous charges dynamiques	57
5.6	Courbe caractéristique dynamique du dissipateur	57
5.7	Variation de la quantité d'énergie absorbée	58
6.1	Schéma d'ensemble du bâtiment	61
6.2	Schéma de la structure	62
6.3	Schéma du système de dissipateurs	63
6.4	Structure et éléments	66
6.5	Modèle analytique	68
6.6	Courbe caractéristique du système de dissipation	68
6.7	Influence de la force de glissement sur le déplacement max.	70
6.8	Influence de la force de glissement sur l'effort tranchant max.	71
6.9	Accélérogrammes utilisés	73
6.10	Périodes et formes modales	74
6.11	Déplacements relatifs max. de plancher	75/76
6.12	Efforts tranchants max.	76/77

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU	TITRE	PAGE
2.1	Classification des systèmes de contrôle structural	13
4.1	Programme de chargements sur dissipateur isolé	47
5.1	Programme de chargements du dissipateur en contexte	55
6.1	Valeurs des forces sismiques de calcul de la structure	65
6.2	Caractéristiques des profilés de la structure	66
6.3	Valeurs du paramètres F_i	69
6.4	Valeurs du taux de réduction du déplacement du 9 ^{ème} plancher.	78

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

I. EFFETS DES SEISMES ET APPROCHES PARASISMIQUES

Les séismes: De phénomènes... à catastrophes

Un séisme en soi, est un phénomène naturel qui résulte d'une libération brusque et brutale d'une immense quantité d'énergie, initialement produite par le mouvement en ballet des plaques tectoniques et stockée au sein de la croûte terrestre. Il se manifeste en surface, entre autres, par un mouvement vibratoire du sol pouvant affecter de grandes étendues de la surface du territoire d'un pays. Mais du fait de l'interaction de ses effets avec les constructions et compte tenu de son potentiel endommageant, de phénomène naturel il peut se transformer en catastrophe emportant souvent plusieurs vies humaines, laissant des milliers de sans abris et entraînant la ruine de nombreuses constructions.

Cependant, il est significatif de bien noter que la plupart des pertes en vies humaines qui ont fait suite à toutes les catastrophes sismiques sont à attribuer essentiellement à la ruine (*i.e.* à l'effondrement total ou partiel des structures et/ou à l'endommagement des structures ou de leurs éléments structuraux ou non structuraux) des ouvrages de génie civil, particulièrement les bâtiments. Cette constatation majeure a interpellé les chercheurs et ingénieurs en génie civil notamment, à agir et faire face aux séismes de façon rationnelle et systématique. C'est ainsi que des approches parasismiques successives ont été élaborées, mises à l'épreuve et évaluées et puis ont été améliorées ou supplantées par d'autres approches plus achevées.

Pour y faire face, une première approche rationnelle, celle en cours, ...

Pour réduire les effets des tremblements de terre, l'approche en cours mise notamment sur une meilleure connaissance et sur l'amélioration des propriétés

dynamiques des systèmes structuraux latéraux classiques et sur la possibilité d'accroître leur résistance parasismique. En d'autres termes, cela revient à adapter la conception architecturale et structurale de ces systèmes, perfectionner les méthodes d'analyse, de calcul et de dimensionnement, apporter beaucoup de soin aux matériaux utilisés et améliorer les méthodes de constructions pour les ouvrages nouveaux et les méthodes de réparation ou de renforcement pour les ouvrages existants. Cependant, pour pouvoir faire face à des séismes majeurs, l'approche reconnaît la nécessité d'accepter des dommages structuraux d'un certain degré et dans certains endroits de ces systèmes structuraux. Pour cause, il est connu que la sévérité de la frappe d'un séisme sur un ouvrage dépend du rapport qu'entretiennent les propriétés dynamiques de l'ouvrage d'une part, et des caractéristiques du mouvement vibratoire du sol, d'autre part. Il est connu aussi que la majorité des ouvrages de génie civil, bâtiments compris, ont des fréquences naturelles qui coïncident avec la bande fréquentielle dominante des séismes et que ce fait a comme conséquence, la manifestation du phénomène de résonance qui augmente les déformations (et contraintes) des structures de ces ouvrages de façon excessive et dangereuse. Il s'ensuit qu'il est théoriquement impossible de concevoir des systèmes structuraux pouvant résister à des séismes majeurs sans subir de dommages et surtout qu'il est pratiquement difficile du point de vue technique et injustifiable du point de vue économique de réaliser pareil type de structures. Cet argument justifie la nécessité d'accepter des dommages mais d'un certain degré et en certains endroits pour ne pas atteindre l'effondrement de ces structures et ainsi pour pas remettre en cause l'exigence de sauvegarder les vies humaines. Le principe d'acceptation de dommages signifie, en termes de la mécanique des structures, qu'il faut assurer la formation et le développement de plastifications suffisantes. Ces plastifications ont pour effets d'augmenter l'amortissement et de décaler les fréquences naturelles des structures ce qui favorise la prévention du phénomène de résonance et limite les déformations maximales de ces structures.

En fait, l'approche courante décrite plus haut, mise sur l'amélioration des propriétés de résistance et de flexibilité des systèmes structuraux latéraux classiques et sur la possibilité de les doter ces systèmes avec une capacité suffisante à développer des plastifications. Concernant cette dernière notion, le discours scientifique s'y réfère en utilisant le concept de ductilité qui peut être définie comme le quotient de la déformation ultime sur la déformation correspondant au début de l'écoulement plastique. Dans un certain sens, la ductilité d'une structure représente la réserve de déformabilité qui se

situé au delà du domaine élastique mais avant la phase de l'effondrement. Elle peut être aussi considérée, mais sous certaines réserves, comme un indicateur de la capacité de dissipation d'énergie des structures. En résumé, il est juste d'affirmer que l'approche courante, en œuvre actuellement dans le domaine du génie sismique, repose sur une combinaison judicieuse de la résistance, de la flexibilité et de la ductilité des structures pour obtenir des structures réalisables et économiques d'une part et qui ne s'effondrent pas sous séisme majeur d'autre part.

C'est sur cette approche qu'est fondé la sécurité antisismique se trouvant dans l'esprit de tous les règlements parasismiques nationaux, y compris le règlement algérien. Dans son aspect opérationnel, elle consiste d'une part, en phase d'étude d'un ouvrage et selon le cas, soit à remplacer l'action sismique par un système équivalent de forces latérales statiques, dont les valeurs sont obtenues essentiellement par des formules empiriques et effectuer une analyse statique, ou soit à évaluer les effets de cette action en effectuant une analyse dynamique, spectrale ou temporelle, pour déterminer dans tous les cas, les sollicitations et procéder au dimensionnement des éléments structuraux (poutres, poteaux, barres, voiles, nœuds, ...). Ces opérations résolvent le problème de la résistance et de la flexibilité de la structure de l'ouvrage. Elle consiste d'autre part, à respecter en phase de construction, certaines dispositions constructives portant sur les sections des éléments et sur la structure. Cette autre opération résout le problème du comportement ductile de la structure. Au terme de l'ensemble de cette démarche, la l'ouvrage est jugé parasismique au sens de l'approche en question, ou au sens des règlements qui s'en inspirent.

Cependant, cette approche présente quelques insuffisances ...

Néanmoins, aussi louable soit - elle, cette approche présente tout de même quelques insuffisances. La notion de ductilité d'une structure est fondée sur l'hypothèse d'un chargement monotone et unidirectionnel. Or, l'action sismique produit un chargement cyclique, alterné et multidirectionnel. Par conséquent, le concept de ductilité ne peut rendre compte avec rigueur du comportement post élastique des structures sous chargement sismique.

Sous séisme majeur, la structure est supposée avoir un comportement dissipatif, qui prend la forme de déformations plastiques dans les éléments structuraux. Dans une structure en portique par exemple, ces déformations plastiques prennent place dans les extrémités des poutres ou au voisinage des nœuds. Pour les portiques en charpente

métallique, des tests ont permis de constater qu'il y a apparition prématurée de voilements locaux lors du processus de plastification des extrémités des poutres et que les assemblages ne sont pas fiables. Pour les portiques en béton armé, des ruptures d'adhérence des armatures ont été observées [Teramoto et Ouakli 1989]. Ces problèmes perturbent le processus de dissipation d'énergie, faussent le comportement escompté et font hâter l'effondrement des ouvrages.

De plus, cette approche n'est pas en mesure de satisfaire pleinement aux nouvelles exigences en matière de sécurité antisismique. En effet, dans le cadre de cette approche, si le non effondrement des structures sous séisme majeur est garanti, il n'en demeure pas moins que les structures elles même se trouveront dans un état d'endommagement souvent très avancé, menant vers des renforcements compliqués voire même des démolitions d'ouvrages, opérations coûteuses voire même ruineuse pour certaines sociétés.

En alternative, une nouvelle approche commence à poindre...

Une approche alternative concernant la conception parasismique des structures a été élaborée, depuis peu, par plusieurs chercheurs et ingénieurs en génie civil. Elle se propose de pallier les insuffisances de l'approche courante et de fournir aux problèmes de sécurité, d'économie, de durabilité des ouvrages et de confort de leurs usagers, des solutions achevées respectant les nouvelles exigences en matière de construction. Il s'agit du contrôle structural. Dans l'un de ces aspects, elle consiste en principe, à séparer la fonction dissipation d'énergie d'une structure de la fonction portance de charges, à attribuer la première à des dispositifs non structuraux indépendants et à conserver la seconde pour la structure [Ouakli 1989]. La structure conçue sur la base de cette approche est libérée de toute déformation plastique sous séisme majeur et ne subit donc aucun dommage. Les dispositifs, installés à l'intérieur de la structure, concentrent au sein de leur substance même, tous les dommages attendus et comme ils sont indépendants, ils peuvent être entretenus et remplacés à volonté. Cet aspect de l'approche porte le nom de contrôle structural par des dispositifs de dissipation d'énergie. L'isolation sismique est un autre aspect de l'approche et consiste à placer un filtre empêchant la coïncidence dangereuse des fréquences de la structure avec celles de l'excitation sismique.

Les notions de ductilité et de dispositions constructives, centrales dans l'approche traditionnelle mais peu satisfaisantes, deviennent inutiles dans un système de contrôle structural.

Les prestations que fournit le contrôle à travers ses multiples aspects et applications présentent beaucoup d'avantages qui compensent largement son seul inconvénient à savoir le coût additionnel des dispositifs. Des gains sur les coûts de construction sont substantiels, l'exploitation des ouvrages n'est pas interrompue, le champ d'application est plus vaste et les dispositifs spéciaux sont faciles à inspecter, à entretenir et à remplacer.

II. OBJECTIFS DU SUJET

Le contrôle structural comprend plusieurs techniques, employant des technologies très variées. Beaucoup de travaux de recherche, portant sur différentes technologies du contrôle structural, ont été effectués.

La présente thèse a pour objet l'étude d'un système de contrôle de la réponse sismique des structures de bâtiments au moyen d'un type particulier de dispositifs de dissipation d'énergie par frottement. Ce type de dissipateur a été proposé, conçu et développé par une équipe de recherche japonaise.

Les objectifs principaux de cette recherche sont

- Le point des connaissances sur le contrôle structural en général et sur le contrôle structural par dissipateurs à frottement.
- La caractérisation dynamique du dissipateur d'énergie à frottement
 - isolé,
 - en contexte.
- L'évaluation de son efficacité à contrôler le déplacement inter planchers des structures de bâtiments soumis à des chargements sismiques en vue de prévenir les dommages et d'assurer la pérennité de l'exploitation de ces bâtiments pendant et après un séisme majeur.

Les investigations expérimentales, auxquelles l'auteur du présent rapport a partiellement assisté au déroulement, en qualité d'étudiant de post graduation en génie sismique et dont une partie des résultats obtenus est reportée dans ce rapport, ont été faites dans un laboratoire japonais.

III. ORGANISATION DU RAPPORT

Le rapport s'ouvre d'abord sur un premier chapitre, introduisant le sujet traité, se prolonge ensuite par le développement de l'objet de l'étude, composé de cinq chapitres

et se termine enfin par quelques conclusions et recommandations contenues dans un dernier chapitre.

Les chapitres qui composent le développement, sont articulés pour donner cohérence et clarté au document. Le chapitre 2 fait le point des connaissances sur le contrôle structural en général et sur les dispositifs de dissipations d'énergie en particulier. Il met l'accent de façon distincte sur les dissipateurs à frottement compte tenu de leur étroite relation avec le sujet traité. Des rappels détaillés sur les différents aspects tant théoriques que pratiques ainsi que des développements de quelques notions nouvelles sur le phénomène du frottement figurent dans le chapitre 3. Les chapitres 4 et 5, traitent de la caractérisation dynamique du type particulier de dissipateurs à frottement choisi dans le cadre de cette étude. Cette caractérisation est menée d'abord pour le dissipateur seul et ensuite pour le dissipateur installé sur un modèle de structure élémentaire représentatif de l'environnement réel en phase d'exploitation. Le chapitre 6 comprend une application qui a pour but d'évaluer l'efficacité du dissipateur en question dans la réduction de la réponse sismique de la structure métallique d'un bâtiment de 9 étages.

CHAPITRE 2

LE CONTROLE STRUCTURAL

I. INTRODUCTION

Dans le cas d'une structure classique devant faire face l'action d'un séisme, il y a toujours une sorte de confrontation, par le truchement des propriétés dynamiques, entre cette structure et le séisme. Dans cet affrontement, la structure est appelée à opposer une résistance si l'agression sismique est modérée et à opposer une résistance et mettre en œuvre un processus structural de dissipation d'énergie, c'est à dire subir des plastifications suffisantes mais en dessous de celles menant à l'effondrement, si l'agression est majeure. Dans tous les cas, ces plastifications génèrent des dommages structuraux et non structuraux.

Dans une structure avec système de contrôle, il en va autrement. La structure peut être

- soit *isolée*, du point de vue dynamique et donc, il n'y a plus d'affrontement entre structure et séisme;
- soit dotée de *dispositifs* amovibles, qui prennent en charge individuellement en la séparant de la structure, la fonction *de dissipation d'énergie*; la structure étant appelée à affronter le séisme, ne lui oppose alors qu'une simple résistance. Il est utile de rappeler que dans une structure classique ces fonctions sont confondues dans la substance même de la structure;
- soit équipée d'un *dispositif plus complexe* qui lui permet de subir, non pas un affrontement de l'agression sismique mais plutôt *une adaptation*, en ajustant de façon continue et au moment même du chargement, les propriétés dynamiques de cette structure.

II. HISTORIQUE DU CONTROLE STRUCTURAL

Durant les dernières décades, l'évolution du contrôle dans le domaine du génie civil a été rapide, particulièrement aux Etats unis d'Amérique, pays natal et berceau du contrôle structural, puis ultérieurement au Japon avant de se propager vers d'autres pays industrialisés.

Historiquement, dans le domaine du génie civil, la première fois où la notion de contrôle structural a été employée remonte à plus d'un siècle. La littérature spécialisée américaine en attribue la paternité à John Milne, professeur de Génie civil, installé au Japon, qui construisit une maisonnette expérimentale et la plaça sur des rondins en bois pour démontrer qu'il peut ainsi contrôler les vibrations dues aux séismes en l'isolant du sol sur lequel elle est bâtie. L'idée fut néanmoins abandonnée faute d'un fondement théorique approprié.

Plus tard, le développement de la théorie des systèmes linéaires ainsi que celui de la dynamique des structures qui s'étalèrent sur le premier quart du siècle passé, remettent à l'ordre du jour les problèmes posés par les vibrations mais cette fois ci dans le domaine du génie mécanique. L'impulsion à ce développement fut donnée par le moteur à combustion interne qui produisait des vibrations excessives, inhérentes à son fonctionnement, aux points de fixation sur la structure du support. La recherche de solutions à ces problèmes de vibrations aboutit rapidement, durant la période de la deuxième guerre mondiale, aux concepts d'isolation, d'absorption et d'amortissement des vibrations qui furent développés et appliqués dans la fabrication de systèmes de support et de suspension d'automobiles ou d'avions.

Le contrôle, entendu dans le sens de maîtrise de la conduite ou de la manœuvre de véhicules ou d'appareils, est assez récent et plonge ses racines dans le domaine de l'aérospatiale, où certains problèmes, tels que le repérage, le pointage et la filature d'objets volants en mouvement, ont poussé à concevoir et à étudier cette nouvelle technique en vue d'applications à caractère militaire.

Progressivement, le contrôle s'étendit à d'autres branches du génie mécanique avant d'investir enfin, dès les années soixante, le domaine du génie civil pour faire face aux problèmes de structures tels que ceux de la limitation des dommages et de l'amortissement des vibrations des structures potentiellement sujettes à des actions naturelles extrêmes telles que celles des séismes ou du vent. Il devient ainsi le contrôle structural.

Cependant, le contrôle structural a des traits particuliers qui le distinguent du contrôle en génie mécanique et qui gouvernent l'orientation que doit prendre la recherche dans ce domaine. A titre d'exemple, les structures de génie civil sont ancrées dans le sol et sont donc statiquement stables, le recours au contrôle paraît de prime abord suspect, car pouvant entraîner leur déstabilisation, alors que l'objet même du contrôle de structures spatiales est d'assurer leur stabilité. Aussi, le contrôle structural tend - il à se détacher du contrôle en mécanique et à se développer dans une forme spéciale des problèmes vibratoires, qui concernent les corps massifs, de grande taille, fondés dans le sol et dont le mouvement vibratoire peut être contrôlé soit par modification de leurs propriétés dynamiques en utilisant divers mécanismes (contrôle passif) soit par application de chargements antagonistes, contrôlés de l'extérieur, qui s'opposent en temps réel, à ce mouvement (contrôle actif).

Aujourd'hui, il est bien établi que le contrôle structural peut être considéré comme un important parti devant être pris en compte lors de l'étude des structures d'ouvrages devant faire face aux séismes. En effet, des bâtiments et des ponts, employant le contrôle structural ont été construits dans certains pays avancés et ont prouvé que cette nouvelle technique est faisable et fiable. L'extension de l'emploi du contrôle structural à d'autres pays, comme l'Algérie par exemple, est possible et peut être techniquement envisagée.

III. ENJEUX DU CONTROLE STRUCTURAL

Les enjeux liés au contrôle structural sont très importants pour tous les pays dont le territoire est sujet à des séismes majeurs potentiellement destructeurs et où le risque sismique y est élevé comme il est le cas pour l'Algérie. En effet, des séismes modérés et majeurs secouent régulièrement le Nord de l'Algérie où résident la majorité de sa population, où se déroulent l'ensemble de ses activités économiques, sociales et culturelles et où, entre autre, se trouve une forte proportion de ses constructions et ouvrages. De plus, dans le futur cette partie du territoire est appelée à recevoir l'essentiel des projets de constructions. Parmi ces constructions, y figureront certains bâtiments, tels que les hôpitaux et les centres de la protection civile par exemple, ayant un statut d'ouvrages stratégiques eu égard aux exigences fixées pour les systèmes d'organisation des secours et de rétablissement post séismiques dont ils font partie, doivent rester opérationnels pendant et après un séisme. Y figureront aussi d'autres bâtiments, tels que les centres de télécommunications et les centres informatiques des établissements

financiers ou autres, devant bénéficier d'une protection antisismique exceptionnelle compte tenu de la grande sensibilité physique et de la valeur économique et sociale des équipements qu'ils abritent.

L'approche classique de la protection antisismique applicable aux structures de bâtiments, certes louable s'il s'agit de bâtiments courants, peut s'avérer inefficace dans le cas de ces bâtiments. Aussi, est il raisonnable d'estimer que le caractère stratégique et/ou sensible de ces bâtiments, non seulement justifie largement mais nécessite véritablement que leur comportement dynamique soit amélioré et mieux maîtrisé et de recourir ainsi à une approche plus adaptée comme le contrôle structural.

Dans des domaines autres que celui du bâtiment, le recours au contrôle structural s'imposera certainement dans le futur. Les ponts modernes, par exemple, sont de plus en plus flexibles, flexibilité qui tire son origine entre autres de l'utilisation de nouveaux matériaux de construction à performances élevées, ce qui les rend particulièrement sensibles aux actions sismiques ou à celles du vent.

Des raisons autrement plus importantes nécessitent d'envisager, d'ores et déjà, le contrôle structural pour les constructions futures. Les contraintes découlant d'un aménagement urbain rationnel et nécessaire ainsi que l'inextensibilité des sites constructibles d'un côté et la pression induite par la demande sociale en matière de construction de l'autre, obligeront les constructeurs, dans le futur, à projeter et réaliser des immeubles de grande hauteur et à les implanter souvent sans alternative possible, en des sites où l'aléa sismique peut être très élevé. Le risque sismique potentiel associé à ces immeubles et les effets liés à leur hauteur exceptionnelle imposeront certainement une approche tout à fait nouvelle pour satisfaire aux exigences de leur sécurité sismique. En effet, concernant la sécurité sismique des personnes et des biens et la sûreté de ces immeubles de grande hauteur, l'approche parasismique classique devient caduque à cause de leur caractère exceptionnel qui les place hors du champ d'application de celle-ci. De plus, dans cette approche l'objectif explicite fixé pour les structures est le non effondrement au cours d'un événement sismique majeur et le but implicite qui leur est assigné est seulement la sauvegarde des vies humaines. Quant à l'intégrité des structures après séisme, aucun objectif n'est fixé et par conséquent, ces structures peuvent atteindre un état d'endommagement très avancé, pouvant aboutir à des renforcements complexes ou à des démolitions, opérations coûteuses pour la collectivité. Aussi, est il largement justifié de recourir à une autre approche, plus adaptée, comme le contrôle

structural pour maîtriser davantage le comportement dynamique de ces bâtiments exceptionnels et satisfaire ainsi aux exigences de sécurité et d'économie.

A travers les quelques cas cités précédemment et les arguments qui les étayent, l'on peut constater et s'en convaincre que les enjeux liés au contrôle structural sont effectivement importants, y compris pour la société algérienne. Le terme de ces enjeux est donc l'obtention de structures qui satisfont les critères fixés aux constructions modernes; à savoir l'obtention de structures exemptes de dommages pour préserver l'intégrité structurale avant et après séisme et exemptes de vibrations pour assurer la protection des équipements sensibles et pour le confort des usagers de ces constructions[Bouquin 1997]. Il en ressort ainsi du sens que prennent ces enjeux, qu'il est tout à fait opportun que des investigations et des travaux de recherche soient impulsés d'ores et déjà, et menés à leur terme dans les diverses branches du contrôle structural et préparer ainsi l'avenir de la construction en Algérie.

Bien entendu, à l'heure actuelle et eu égard à la situation qui prévaut dans le pays en général et dans le secteur de la construction en particulier, la perspective d'y introduire le contrôle structural semble illusoire et surtout lointaine. Cependant, l'on peut affirmer sur la base d'une analyse objective qu' à l'avenir, notre société ne peut plus, au risque de s'estomper, se permettre d'accuser davantage de retards et d'autres inerties en matières scientifique et technologique.

IV. CLASSIFICATION DES SYSTEMES DE CONTROLE

41. Terminologie

Les différents termes composant le champ lexical spécifique au contrôle structural ont des significations rigoureuses, consacrées dans la pratique et rapportées par la littérature spécialisée en la matière. Pour éviter les équivoques et les fausses interprétations qui peuvent découler d'un usage abusif, il est nécessaire de préciser le sens des principaux termes utilisés.

Contrôle actif

Un système de contrôle actif est un système dans lequel une source d'énergie, extérieure à la structure est nécessaire et une unité d'asservissement contrôle l'action exercée par des vérins sur la structure. Dans ce système, les caractéristiques déterminantes de la structure sont ajustées, continuellement et en temps réel, en fonction des caractéristiques de l'excitation, mesurées par des capteurs physiques;

optiques ou électroniques, de façon à ce que la valeur de la réponse de la structure ne dépasse pas des valeurs prescrites. L'action exercée peut, selon l'état de la structure, ou dissiper de l'énergie introduite dans cette structure ou lui fournir de l'énergie. Il est possible aussi que les signaux de commande transmis aux vérins soient fonction de la réponse de la structure. Le système vise alors à imposer des actions en certains points de la structure en fonction de l'état de cette dernière.

Le contrôle actif communique à la structure une certaine adaptabilité. Les objectifs visés sont la redistribution active des efforts pour le maintien d'un état nominal de la structure et l'amortissement actif dans le cadre d'un comportement en vibration.

Contrôle passif

Dans un système de contrôle passif, l'idée consiste à insérer à l'intérieur de la structure, soit ponctuellement à la base ou en tête ou soit de façon distribué sur les différents niveaux de cette structure, des dispositifs qui isolent dynamiquement la superstructure de la source d'excitation ou qui absorbent et dissipent localement l'énergie introduite. Les dispositifs sont actionnés par le mouvement de la structure même. Ils ont un mode de fonctionnement purement mécanique et passif, c'est à dire sans aucune action commandée et ne nécessitant ni une source d'énergie extérieure à la structure, ni aucune mesure en temps réel.

Contrôle hybride

Le sens usuel du terme contrôle hybride signifie l'utilisation combinée d'un système de contrôle passif avec un système de contrôle actif.

Contrôle semi actif

Un système de contrôle semi actif représente une classe de système de contrôle actif dans lequel les exigences fixées à la source d'énergie extérieure et au système de commande sont moindres que celles d'un système actif. Par exemple, le contrôle semi actif ne peut fournir de l'énergie à la structure. Les dispositifs du contrôle semi actif sont souvent considérés comme des dispositifs passifs contrôlables.

42. Classification

Pour le contrôle des structures, plusieurs variétés de dispositifs, utilisant différents mécanismes et appartenant à divers systèmes de contrôle, peuvent être utilisés[Housner

1997]. Pour se faire une image d'ensemble nette, de toute l'étendue du contrôle structural, il est important de procéder à une classification des systèmes selon le mode de contrôle, de grouper les mécanismes et les dispositifs par familles et par classes présentant des similitudes. Actuellement, aucune classification n'est établie de manière définitive et admise par les membres de la communauté internationale et spécialistes du contrôle structural. Plusieurs classifications, élaborées souvent sur la base de critères différents et par des écoles différentes, coexistent.

La classification présentée dans le tableau 2.1 ci après est une synthèse des classifications couramment employées dans la littérature spécialisée en la matière [Ouakli 2000].

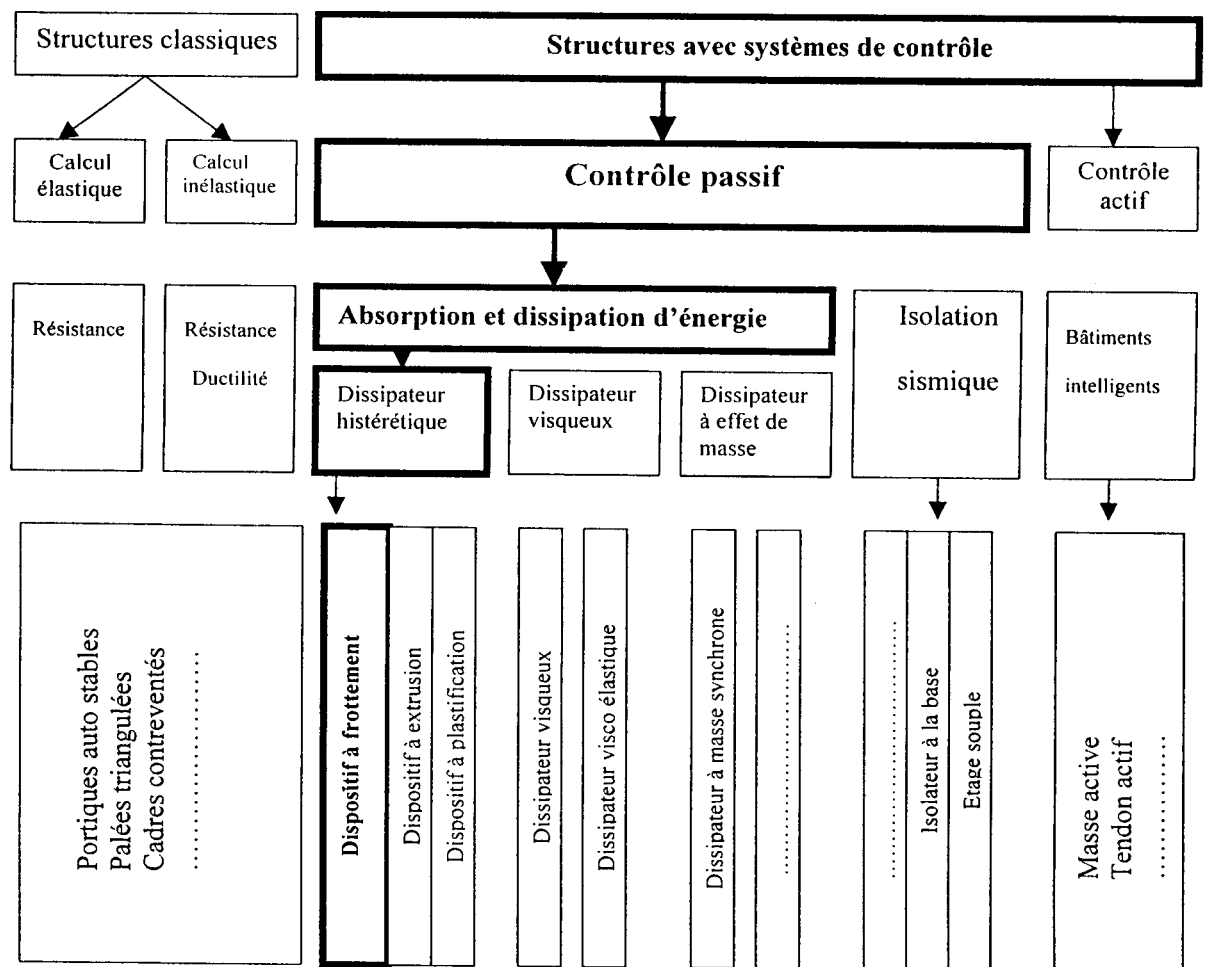


Tableau 2.1 : Classification des systèmes de contrôle structural.

V. CONTROLE ACTIF

Au Japon, c'est Kobori Takuji, qui, en 1950 fut le premier à avoir étudié et développé le concept de contrôle structural actif. Durant la période comprise entre 1950

et 1960, l'idée a été abandonnée car considérée comme purement théorique et donc, sans portée pratique. En effet, il n'y avait pas un réel besoin social qui, pour être satisfait, nécessite le recours au contrôle actif. De plus, la technologie de l'époque était nettement insuffisante pour produire des applications servant de supports au concept. Il y eut plus tard un petit regain d'intérêt mais c'est à partir des années 1980, avec l'arrivée de l'âge de l'information et de la communication et l'expression de nouveaux besoins sociaux en matière de construction qu'augmentera réellement cet intérêt pour le contrôle structural actif. Beaucoup de travaux ont été menés et aujourd'hui, des connaissances étendues sur le sujet sont acquises. La recherche sur le contrôle actif est en progression et, au Japon, elle est en phase de passage du stade conceptuel et expérimental au stade des applications.

Les systèmes de contrôle actif sont d'une grande complexité. Les principes de leur fonctionnement ont la configuration décrite schématiquement sur la figure 2.1 ci après [Soong 1987].

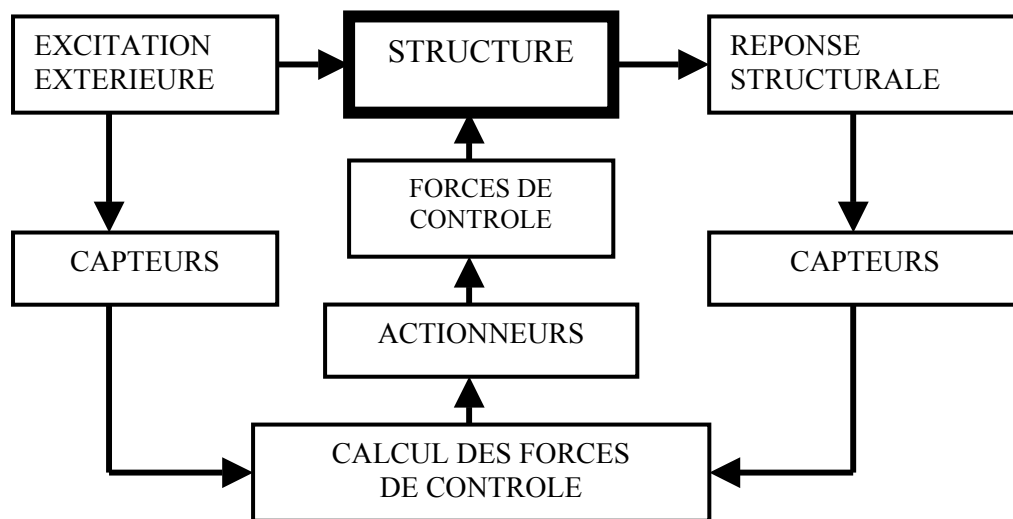


Figure 2.1 : Schéma de principe du contrôle actif

Un système de contrôle structural actif comprend (voir figure 2.2):

- Des capteurs placé sur le sol pour mesurer les variables de l'excitation extérieure (paramètres du mouvement du sol) et / ou dans la structure pour mesurer les variables de la réponse structurale,
- Des unités électroniques de traitement des informations mesurées et transmises par les capteurs et de calcul des forces antagonistes sur la base d'un algorithme de contrôle,

- Des actionneurs (vérins), alimentés par une source d'énergie extérieure, pour produire effectivement les forces de contrôle et les appliquer à la structure.

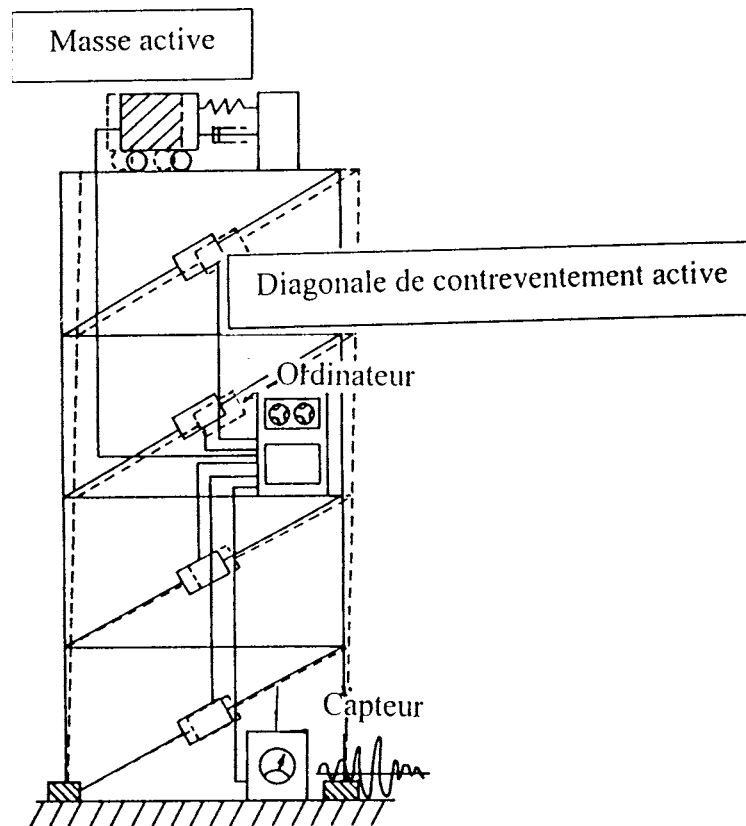


Figure 2.2 : Composants d'un système de contrôle actif

L'excitation ou la réponse, mesurée en continu par le capteur est utilisée par les unités de contrôle, pour corriger en continu l'action des vérins.

Quand les capteurs ne mesurent que les paramètres de la réponse structurale, le système est dit de contrôle à boucle fermée. Le système est dit de contrôle à boucle ouverte quand les forces de contrôle sont régulées uniquement par les mesures des paramètres de l'excitation.

VI. CONTROLE PASSIF

Le contrôle passif peut être obtenu par l'emploi de matériaux spéciaux tels que les aciers à mémoire de forme, par des conceptions originales ou par le rajout de dispositifs qui augmentent la capacité de dissipation d'énergie de la structure ou encore par le rajout de dispositifs d'isolation sismique de la base de la structure, dans laquelle le

premier étage est rendu délibérément flexible, réduisant ainsi la transmission des vibrations dans les étages supérieurs.

Les systèmes de contrôle passif présente, au moins, les 3 avantages suivants

- Ils sont en général relativement moins coûteux que les autres systèmes de contrôle.
- Ils ne nécessitent pas de source d'énergie extérieure (ceci est un avantage car durant un séisme majeur, il peut y avoir rupture d'alimentation en énergie ce qui rendrait le système inefficace s'il s'agit d'un système de contrôle actif).
- Ils sont intrinsèquement stables.

Les ingénieurs spécialistes du contrôle ont tendance à considérer le terme de contrôle passif comme un abus de langage du fait qu'il n'y a aucun signal ou information qui alimente en retour le système et qui permet de déterminer en temps réel la valeur d'un paramètre.

Les procédures de conception et de dimensionnement parasismiques, les règles parasismiques et les techniques de constructions modernes fournissent un degré de protection élevé contre l'effondrement des bâtiments en cas d'événement sismique majeur. Par contre, l'étendue des dommages subis et la possibilité de réutiliser tel quel le bâtiment après coup ou de le réparer préalablement ou de le démolir ainsi que le coût des pertes subies sont laissés dans le vague. La conception et le dimensionnement des structures devant faire face aux séismes est donc une question de décision d'investissement, non seulement en termes de dépenses initiales spécifiques aux phases études et réalisation mais également une question qui pose le problème de la sécurité sur le long terme. Le contrôle passif offre aux maîtres de l'ouvrage des choix stratégiques entre une optimisation commerciale de court terme ou une protection et une conservation de leur ouvrage sur le long terme.

Les systèmes de contrôle passif se subdivisent en 2 grands groupes

- Les isolateurs sismiques
- Les dissipateurs sismiques

VII. DISSIPATEURS D'ENERGIE

71. Généralités

Toutes les structures, en phase opératoire, dissipent de l'énergie; en employant différents mécanismes, tels que le frottement interne des matériaux, la plastification et la fissuration des éléments de structures, etc. Plus la capacité de dissipation d'énergie

d'une structure est grande, plus les amplitudes des vibrations de cette structure seront faibles. Cependant les structures possèdent un amortissement structural très faible, celui des structures métalliques par exemple est de l'ordre de 1 à 2% de l'amortissement critique et sont sujettes, par conséquent, à des vibrations d'amplitude assez élevée souvent préjudiciables même sous séisme modéré. Aussi est-il nécessaire de développer d'autres alternatives pour dissiper l'énergie cinétique induites par les séismes dans les structures.

Beaucoup de dissipateurs d'énergie ont été développés dans le domaine du génie mécanique en vue de leur application dans la construction d'automobiles et d'avions pour augmenter la résistance à l'impact. Mais ces dissipateurs ont été conçus pour résister à des charges monotones et avec comme critère principal une décélération minimale contenue à l'intérieur de contraintes physiques imposées par le déplacement ou course maximale admissible. Ils ne peuvent être transférés directement au domaine du génie civil.

Plusieurs moyens ayant pour objet d'augmenter la capacité de dissipation de l'énergie, spécifique au domaine du génie civil, ont été étudiés et ont abouti sur des applications intéressantes [Kelly et Tsztoo 1977]. Beaucoup d'autres ont été proposés et attendent l'occasion pour donner naissance à d'autres applications [Kelly et al 1972]. L'ensemble de ces moyens constitue les systèmes de dissipation d'énergie, une classe appartenant aux systèmes de contrôle passif.

En effet, au cours des décennies, des efforts importants ont été consentis dans le domaine du génie civil pour développer le concept de dissipation d'énergie ou amortissement supplémentaire, en des technologies opérationnelles et plusieurs types de dissipateurs ont vu le jour, ont été installés sur des structures d'ouvrages répartis à travers le monde et ont largement prouvé leur efficacité [Boardman et al 1983].

Le contrôle de la réponse sismique de la structure d'un bâtiment par des dissipateurs d'énergie consiste à incorporer au sein de la structure, en des endroits privilégiés de celle-ci, des dispositifs de nature métallique, mécanique ou fluide, de caractère discret, indépendant et amovible et dont le rôle est l'absorption et la dissipation de l'énergie introduite par les séismes majeurs. Ainsi leur fonction est la réduction de la réponse sismique de la structure, en terme de déplacement, vibrations ou autres, jusqu'à faire plafonner ou approcher sa valeur d'une valeur-seuil choisie *a priori*. Cette valeur-seuil est généralement choisie suffisamment faible pour que l'intégrité structurale et non

structurale ne soit pas violée ou pour que la pérennité de l'exploitation de l'ouvrage pendant ou après un événement sismique majeur ne soit pas remise en cause.

La dissipation de l'énergie peut être obtenue soit par conversion de l'énergie cinétique (énergie de mouvement) en chaleur soit par transfert d'énergie parmi les modes de vibration de la structure [Kelly et Tsztoo 1978] La première méthode comprend des dispositifs qui fonctionnent sur la base de principes comme celui de la plastification en flexion ou en torsion d'organes métalliques, ou celui du frottement mis en jeu entre les parties en contact d'organes mécaniques, ou encore celui de la transformation de phases des métaux, etc. La deuxième comprend les oscillateurs supplémentaires qui agissent comme des absorbeurs dynamiques des vibrations.

72. Mécanismes de dissipation

Les principaux dissipateurs d'énergie peuvent être classés en 2 groupes, les dissipateurs visqueux et les dissipateurs hystérétiques, selon que l'énergie dissipée dépend de la vitesse ou du déplacement du dispositif.

721. Dissipateurs visqueux

Dans un dissipateur visqueux la force résistante est proportionnelle à la vitesse de chargement [Lin et al 1988]. Habituellement, un fluide visqueux tel que l'huile de silicone est utilisé dans ces dissipateurs. La figure 2.3 illustre un dissipateur visqueux et sa courbe caractéristique.

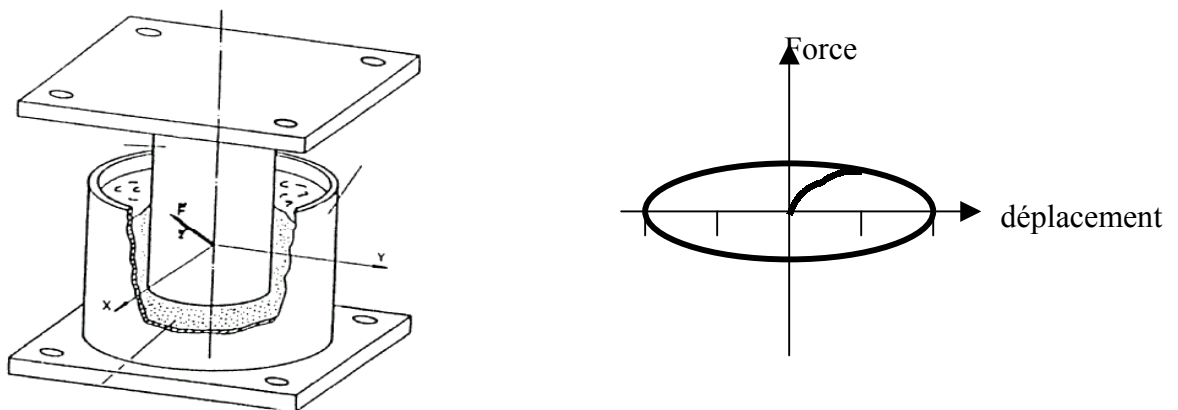


Fig. 2.3: Dissipateur visqueux.

Pour ce genre de dissipateurs, l'influence de la température sur les propriétés du fluide utilisé et les problèmes de maintenance exigent beaucoup d'attention.

722. Dissipateurs hystérétiques

Dans les dissipateurs à effet d'hystérésis, la quantité d'énergie dissipée dépend de toute l'historique du déplacement subi par le dispositif. Dans ces dissipateurs, la valeur de la vitesse du dispositif n'a aucune influence sur la quantité d'énergie dissipée.

Critères et exigences.

Plusieurs types de dissipateurs à hystérésis ont été développés au cours des dernières décennies. Cette prolifération ne signifie pas qu'il y a un besoin de variété mais plutôt parce que des critères rationnels qui permettent d'évaluer et de comparer les performances des divers dissipateurs ne sont pas définitivement établis. Les critères usuels retenus sont décrits ci après [Kelly et Skinner 1979]:

- La quantité d'énergie que peut dissiper le dispositif est un facteur important. Pour dissiper de l'énergie, un dispositif doit produire une force résistante F agissant sur une certaine distance. La quantité d'énergie dissipée U est donnée par la relation

$$U = \int F. dx \quad (2.1)$$

La force résistante est généralement limitée par la force maximale que l'on peut appliquer localement à la structure. La distance est limitée par des considérations géométriques, soit par l'encombrement soit par le déplacement maximal que peut subir une structure sans que la sécurité ne soit remise en cause.

- La performance du dissipateur sous chargement cyclique est un autre facteur à considérer. Cette performance peut être évaluée par la stabilité des boucles caractéristiques du dispositif en fonction du nombre de cycles de chargement.
- L'influence de la vitesse de chargement sur la courbe caractéristique du dissipateur doit être examinée. Quand la courbe dépend de la vitesse, il y a inconvénient car la dépendance introduit des incertitudes sur la valeur de la force résistante.
- La direction dans laquelle le chargement est appliqué est un aspect important. Un dispositif unidirectionnel, par exemple, pour lequel il est exigé de reprendre des déformations multidirectionnelles, nécessite un arrangement convenable.

73. Classification des dissipateurs à hystérésis

Selon le mécanisme de dissipation d'énergie qui y est adopté, les différents types de dissipateurs à hystérésis se subdivisent en 3 groupes.

731. Dissipateurs à plastification

La dissipation d'énergie est obtenue grâce au mécanisme de plastification d'organes métalliques. L'énergie est dissipée dès que l'organe métallique est déformé au delà de sa

résistance limite d'élasticité. L'énergie est absorbée par les changements micrométriques de la structure cristalline du matériau et par une augmentation de la température et dissipée sous forme de chaleur [Tyler 1984]. Les organes en acier de construction doux, comme ceux utilisés en charpentes courantes, sont considérés comme plus avantageux car ils ont un large palier de plasticité, ont une bonne durabilité et ne coûtent pas chers. L'organe dissipateur peut avoir différentes formes et travailler selon différents modes de sollicitations [Tyler 1985]. Il peut avoir soit une forme de barre ou de poutre [Tyler 1983], travaillant en flexion [Bergman et al 1988], ou en torsion ou encore en un mode combinant flexion et torsion, soit une forme d'arc travaillant en flexion curviligne.

Organe en forme de poutre ou de barre de flexion

La barre de flexion illustrée sur la figure 2.4 est un dispositif simple dans lequel l'écoulement plastique en flexion est utilisé pour absorber et dissiper de l'énergie. La courbe caractéristique réelle de cet élément est montrée sur la figure 2.5

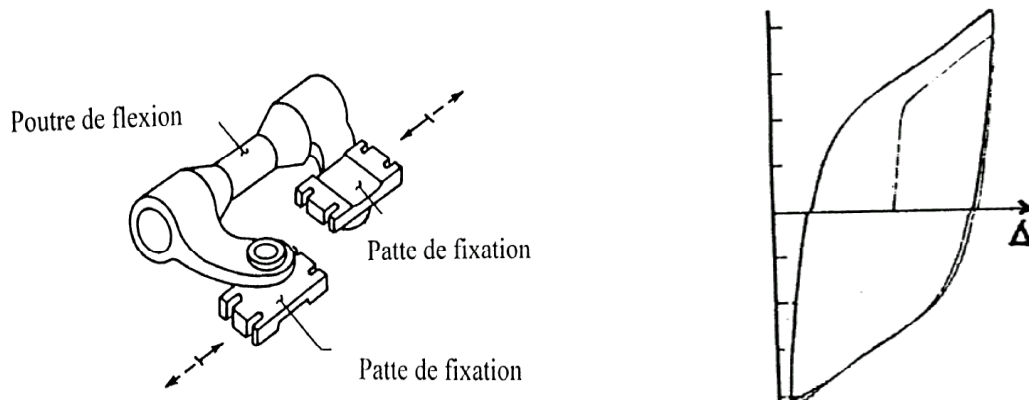


Fig. 2.4: Dispositif de flexion

Fig. 2.5 : Courbe caractéristique du dispositif

Cette courbe peut être décrite par le modèle de Ramberg Osgood représenté sur la figure 2.6.

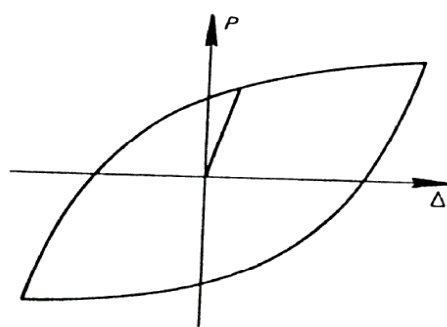


Fig. 2.6. : Modèle de Ramberg Osgood

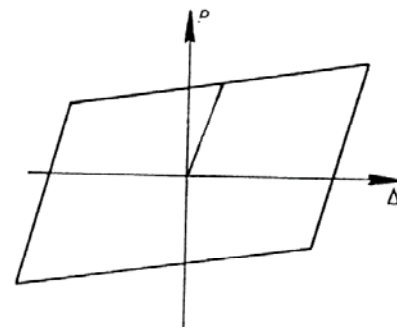


Fig 2.7 : Modèle élasto plastique

Cependant pour les calculs analytiques, la courbe caractéristique peut être représentée avec suffisamment de précision par un modèle bilinéaire élasto plastique (voir figure 2.7).

Organe en forme de poutre en torsion

La figure 2.8 illustre un dissipateur dont l'organe est une poutre de torsion. La dissipation se fait par écoulement plastique en torsion. L'écrouissage post écoulement est dans ce cas plus faible résultant ainsi une quantité d'énergie dissipée par cycle plus élevée. La ruine de ce dispositif est prévisible et donc non catastrophique car elle est initiée par une fissuration se développant lentement et progressivement. La courbe caractéristique et les modèles sont similaires à ceux correspondant à l'organe en poutre de flexion.

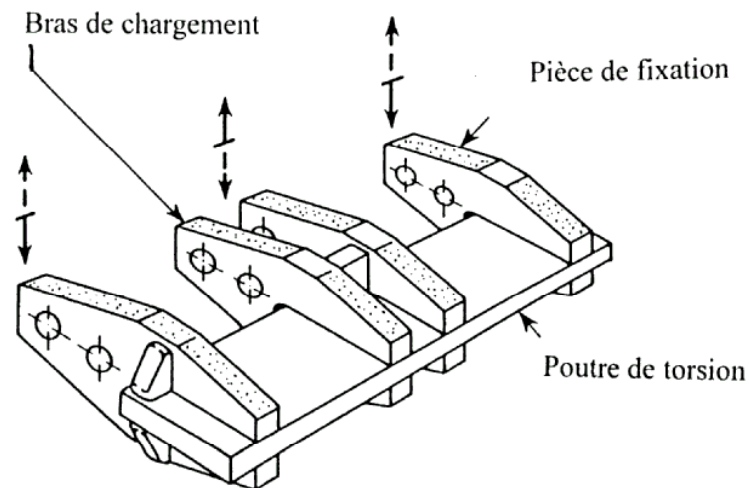


Fig. 2.8 : Dispositif de torsion.

732. Dissipateurs à transformation de phase

L'extrusion est le procédé par lequel un bloc de métal est forcé par compression de s'écouler à travers un orifice dont la section transversale est plus petite que celle du bloc de métal. Le dispositif à extrusion absorbe de l'énergie par transformation de la microstructure du métal quand il est soumis à une forte compression [Key 1984]. Le bloc reprend sa microstructure dès que la force de compression est supprimée. Un dispositif à extrusion utilisant le plomb est montré sur la figure 2.9 a.

Sa courbe caractéristique, illustré sur la figure 2.9 b, peut être représentée par un modèle bilinéaire rigide parfaitement plastique ou modèle de Coulomb comme montré sur la figure 2.9 c.

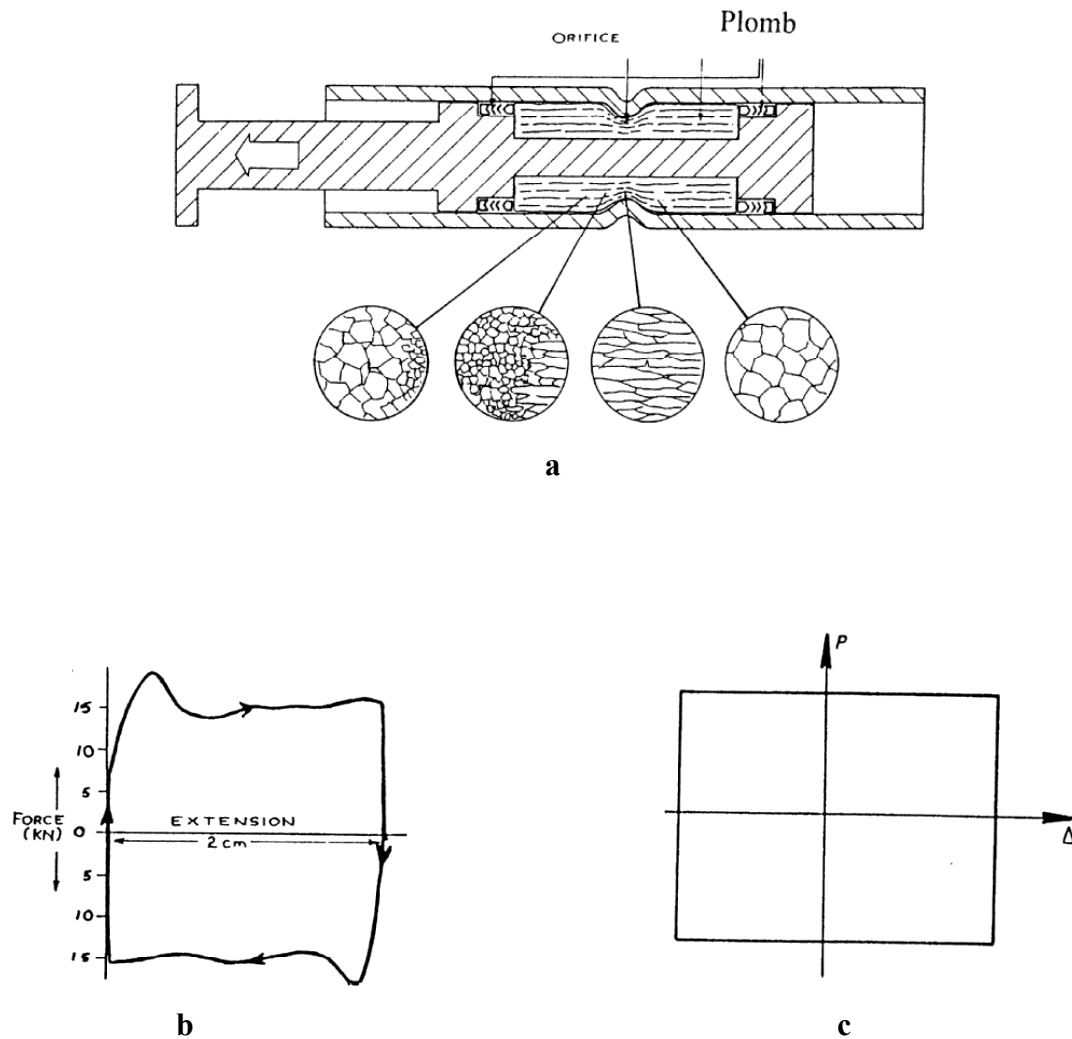


Fig. 2.9 : Dispositif à extrusion et modèles

733. Dissipateurs à frottement

Le frottement est un mode de conversion d'énergie cinétique couramment utilisé dans le domaine de la mécanique et ayant de nombreuses applications comme par exemple le freinage des roues des véhicules. Le produit de cette conversion est essentiellement de la chaleur néanmoins des micro déformations plastiques des aspérités des surfaces de contact se produisent également. Plusieurs types de dispositifs employant le frottement ont été développés[Tyler 1985]. A titre d'exemple, les assemblages boulonnés des charpentes métalliques peuvent dissiper de l'énergie par frottement. Mais dans ce cas, la quantité d'énergie dissipée est faible car le déplacement de glissement ou course est faible (jeu des boulons) et il n'est souvent pas possible de l'augmenter sans se heurter à d'autres exigences structurales, telle que la rigidité des nœuds.

D'autres dissipateurs à frottement, de conception plus fine, ont été développés et étudiés. Le dissipateur Pall et Marsh [Filiatrault et Cherry 1988][Filiatrault et Cherry 1987] (voir figure 2.12), développé au Canada, a été étudié par Filiatrault et Sherry. Il utilise des patins en téflon et a l'avantage d'être de fabrication et de montage faciles.

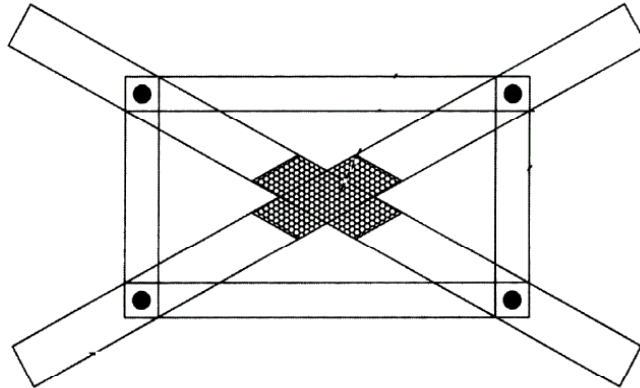


Fig. 2.10 : Dissipateur Pall

Le dissipateur Sumitomo, développé au Japon, a été étudié par Teramoto et par Aiken [Teramoto et al 1988]. Ce dissipateur, plutôt mécanique que métallique, utilise une technologie particulière.

Une étude détaillée du mécanisme et un traitement approfondi de la technologie de ce dissipateur feront l'objet des chapitres qui suivront.

CHAPITRE 3

LE FROTTEMENT

I. GENERALITES

Dans tous les systèmes physiques mécaniques, on se heurte presque toujours au phénomène de frottement qui est en relation avec les transformations de l'énergie d'une forme en une autre, habituellement de l'énergie mécanique (énergie cinétique ou de mouvement) en énergie thermique (chaleur). Le frottement, dans son sens le plus général, est un phénomène physique, très courant, qui se manifeste à l'intérieur des fluides et des solides déformables en mouvement vibratoire; à l'extérieur, sur les surfaces des corps solides en mouvement dans un milieu fluide et aux interfaces des solides en contact appartenant à des systèmes mécaniques ou structuraux et qui sont au repos ou en mouvement relatif les uns par rapport aux autres.

Selon que le système mécanique est simple; un corps solide ou un milieu fluide en mouvement vibratoire ou qu'il est composé de 2 corps, solide / solide ou solide / fluide en mouvement relatif, on distingue 2 sortes de frottement: le frottement interne et le frottement externe.

11. Frottement interne.

Au cours du mouvement vibratoire d'un solide déformable, un *frottement interne* au matériau constituant ce solide apparaît sous forme de forces qui s'opposent aux vibrations et qui finissent par les amortir. Il se manifeste, dans le cas d'un matériau homogène tel que l'acier de construction par exemple, par des modifications intracristallines (migrations des atomes, migrations des dislocations, etc.) et inter-cristallines (interactions des cristaux de matière) et dans le cas d'un matériau composite comme le

béton armé, par des modifications inter-granulaires. Ce frottement interne aux solides, et plus particulièrement aux matériaux de structures, est à la source de l'amortissement des vibrations et est aussi appelé amortissement. Son influence est tout à fait reconnue et prise en compte, certes de manière peu rigoureuse, lors des analyses dynamiques de structures vibrantes. Effectivement, il n'y a pas à l'heure actuelle, une théorie scientifique qui rend compte du frottement interne avec rigueur. En dynamique des structures, beaucoup d'hypothèses et de théories concernant l'amortissement du mouvement vibratoire qui découle de ce frottement, ont été avancées mais toutes aboutissent, pour des raisons formelles (résolution aisée des équations différentielles régissant le mouvement), à des lois artificielles, jamais validées par l'expérience. De plus, le frottement interne des corps solides étant diffus et aléatoire, il s'ensuit qu'il ne peut être mobilisé dans le cadre d'un contrôle structural.

Il en est de même d'un fluide en mouvement vibratoire. Un frottement *interne* au fluide apparaît sous formes de forces s'opposant au mouvement différentiel des différentes couches constitutive du fluide. Ce frottement interne au fluide est appelé aussi viscosité.

12. Frottement externe.

Dans les systèmes mécaniques, composés de 2 ou plusieurs solides munis de liaisons démontables, les solides étant au repos ou en mouvement relatif les uns par rapport aux autres, un *frottement externe* à chacun de ces solides, se manifeste soit par une résistance s'opposant à la mise en mouvement de l'un des solides si celui-ci est au repos, soit par son freinage s'il est en mouvement. Dans les systèmes composés d'un solide mobile dans un milieu fluide, ou de 2 solides en mouvement relatif et ayant une interface fluide commune, apparaît un frottement *externe* au solide en mouvement.

C'est de ce frottement externe dont il est question dans la présente étude. Aussi, son examen sera - t - il approfondi dans les paragraphes suivants.

II. TYPES DE FROTTEMENT EXTERNE

Deux types de frottement externe se rencontrent souvent dans l'étude des systèmes mécaniques, à savoir le frottement à sec et le frottement visqueux.

21. Frottement à sec

Ce type de frottement se manifeste entre 2 solides ayant 2 surfaces sèches en contact

direct (sans aucun corps intermédiaire) au repos ou en mouvement relatif. Ce type de frottement est appelé parfois et abusivement frottement solide.

C'est ce type de frottement qui est mis en œuvre dans le cadre de la technologie adoptée pour le dissipateur d'énergie de cette étude. Comme il présente un intérêt tout à fait particulier, le frottement à sec sera traité séparément et en détail dans le chapitre suivant.

22. Frottement visqueux

Ce type de frottement se manifeste entre les surfaces de 2 corps solides entre lesquelles est interposé un corps fluide, ou sur un solide mobile qui se déplace à l'intérieur d'un fluide, liquide ou gazeux, dans lequel il est complètement immergé.

Ce type de frottement est appelé parfois frottement fluide ou, comme dans le dernier cas, résistance à l'avancement. Si le fluide est l'air, on dit qu'il s'agit de frottement aérodynamique.

III. FROTTEMENT VISQUEUX

31. Nature des forces de frottement visqueux.

Le phénomène de frottement se manifeste, on l'a dit plus haut, par des forces qui s'opposent au mouvement des corps. Le frottement visqueux n'engendre que des forces de frottement de glissement ou frottement dynamique. Dans le cas de corps en contact par des surfaces lubrifiées, comme dans celui d'un corps baignant dans un milieu liquide ou gazeux, la force de frottement ne se manifeste qu'en phase de mouvement. Au repos la force de frottement est nulle; c'est ainsi qu'un corps flottant sur un liquide se met en mouvement sous l'action de toute force horizontale extérieure aussi petite que l'on veut; ce qui peut être confirmé facilement par l'expérience. Les forces de frottement visqueux sont donc exclusivement de nature dynamique et dont la valeur dépend de la vitesse du corps.

32. Détermination de la force de frottement visqueux.

Les forces de frottement visqueux d'un corps mobile dans un milieu fluide dépendent de la forme du corps, de sa vitesse et du frottement interne ou viscosité (propriété physique) du fluide. La viscosité est le frottement entre les différentes couches de fluide se déplaçant à des vitesses différentes. Plus la viscosité du milieu est grande, plus

importante est la force de frottement, toutes les autres conditions restant les mêmes par ailleurs.

La viscosité du milieu se détermine par des expériences au cours desquelles on mesure la force de frottement de certains corps dans des conditions déterminées. Une loi régissant le frottement visqueux de 2 surfaces parallèles très rapprochées glissant l'une par rapport à l'autre et séparées par un milieu fluide; liquide ou un gaz, a été établie initialement par Newton.

Sur la figure 3.1 ci après, est montré un schéma synthétique de la méthode utilisée pour déterminer la force de frottement visqueux.

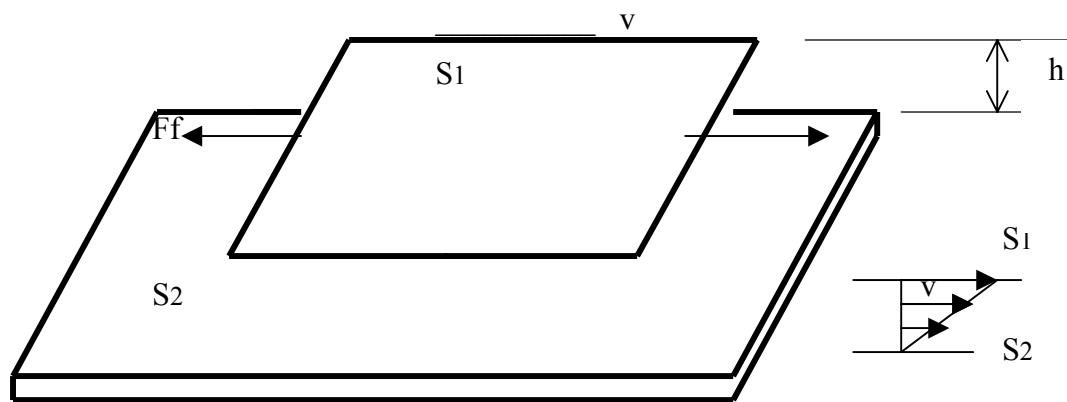


Fig. 3.1 : Force de frottement visqueux.

Si la surface S1 d'aire S parallèle à la surface S2, sous l'action d'une force extérieure F se déplace à la vitesse v de façon uniforme par rapport à la surface S2 au repos, alors la force de frottement F_f appliquée à la surface S1 est égale et opposée à la force F. Sur la base des mesures de la vitesse v et de la force F, Newton a établi la relation suivante :

$$F_f = \eta \cdot S \cdot v / h \quad (3.1)$$

où η est le coefficient de viscosité, dépendant des propriétés du milieu remplissant l'espace entre les surfaces S1 et S2.

h est la distance séparant les 2 surfaces.

Cette relation est vérifiée si $h \ll \sqrt{S}$ c'est à dire si la distance séparant les 2 surfaces en état de glissement relatif, est très petite en comparaison aux 2 dimensions; longueur et largeur, de la surface S1.

Des études détaillées ont montré que les particules du liquide ou du gaz au voisinage de la surface S1 se déplacent à la vitesse v (effet d'entraînement de la surface) tandis que celles se trouvant au voisinage de la surface S2 sont immobiles (effet de solidarisation), la vitesse des particules appartenant aux couches intermédiaires croît linéairement de la valeur nulle à la valeur v .

Pour un corps se déplaçant dans un fluide à une vitesse v relativement faible, la force de frottement visqueux F_f peut être obtenue par la relation suivante.

$$F_f = - K. \eta . v. \quad (3.2)$$

Où

K est un coefficient qui dépend de la forme du corps. Pour un corps sphérique par exemple, $K= 6.\pi.R$.

η est le coefficient de viscosité. Le coefficient de viscosité des liquides décroît quand la température croît, alors que dans le cas des gaz, le coefficient de viscosité croît avec la température.

La valeur du coefficient de viscosité η du milieu peut être déterminée expérimentalement selon diverses méthodes dont les détails sont rapportés dans tous les documents scientifiques classiques.

33. Application du frottement visqueux pour le contrôle sismique

Le frottement visqueux suscite depuis plusieurs années, beaucoup d'intérêt auprès des chercheurs et ingénieurs en génie civil. Plusieurs applications utilisant le frottement visqueux, particulièrement en vue du contrôle de la réponse sismique des structures de bâtiments, ont déjà vu le jour à travers certains pays avancés.

Au titre d'illustration, on peut citer le système structural appelé "murs amortisseurs". Dans ce système, les murs du bâtiment sont constitués, comme le montre la figure 3.2, d'une caisse parallélépipédique creuse, solidaire du plancher bas, dans laquelle est introduite une plaque solidaire du plancher haut et dans le vide restant, est coulé une fluide spécial ayant une grande viscosité pour servir de mécanisme de dissipation des vibrations.

Les vibrations, en l'occurrence les déplacements relatifs inter planchers, sont amorties par la résistance au cisaillement du fluide qui se manifeste entre la plaque et la caisse lors du mouvement.

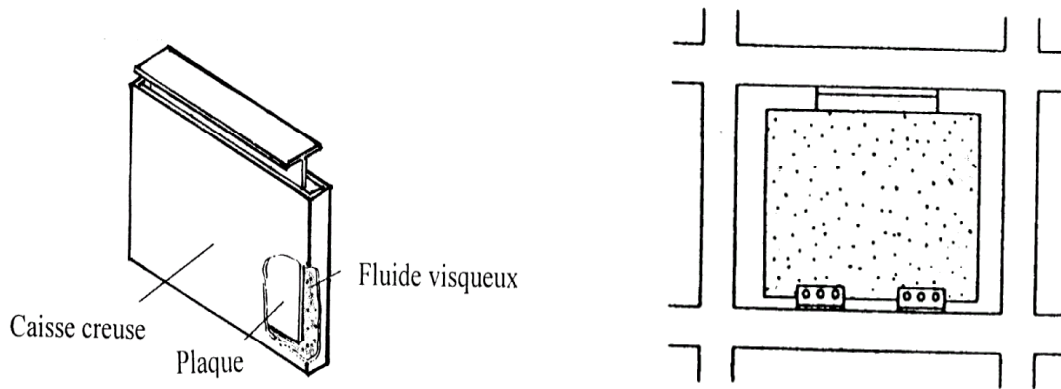


Fig. 3.2 : Mur visqueux

Les murs amortisseurs reprennent le principe même de l'expérience effectuée autrefois par Newton pour déterminer la valeur de la force de frottement visqueux.

D'autres types d'applications de génie civil employant le frottement visqueux sont traitées dans la littérature spécialisée.

IV. FROTTEMENT A SEC

41. Introduction

Le phénomène physique qui est mis en oeuvre dans le cadre de la technologie de l'amortisseur de cette étude étant le frottement à sec, il devient alors opportun et, même nécessaire de faire préalablement le point sur l'état des connaissances qui s'y rapportent. En d'autres termes, cela signifie qu'il est primordial de définir, de caractériser, d'expliquer ses causes, de rappeler éventuellement les théories scientifiques qui le régissent, de dégager ses avantages et de justifier ainsi, le choix de ce type de frottement, parmi tant d'autres, pour le contrôle structural.

Habituellement, dans les systèmes mécaniques (machines par exemple), le frottement constitue une entrave au fonctionnement idéal de ces systèmes car il engendre une dissipation d'une partie de l'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. Le rôle du concepteur de ces machines est alors, à défaut de le supprimer entièrement, de le réduire le plus possible et, pour cela, il recourt à différentes techniques tels que l'adoption de matériaux adéquats (bronze, téflon, etc.) pour les pièces en contact, le traitement (rodage, rectification, polissage,...) ou le graissage des surfaces en contact des pièces de ces machines.

En revanche, dans le cas de la présente étude, le frottement est pris et considéré comme un avantage et comme un atout. Il est donc volontairement recherché en vue d'être mobilisé dans le processus d'absorption et de dissipation de l'énergie introduite par le mouvement sismique dans les structures. La dissipation de l'énergie, même si elle apparaît comme une perte dans le bilan énergétique de la structure, elle s'entend dans cette étude comme une fonction objective et positive du système.

La perception du frottement par les ingénieurs comme pouvant être un phénomène utile n'est pas tout à fait nouvelle. Déjà, dans certains systèmes structuraux d'ouvrages de génie civil, plus particulièrement dans les structures en charpentes métalliques et précisément dans les assemblages boulonnés des éléments de ces structures, le frottement est volontairement recherché et exploité par l'ingénieur, en vue d'améliorer le comportement d'ensemble de ces structures. Il recourt alors, pour accroître ce frottement à diverses techniques de traitement de surfaces parmi lesquelles on peut citer, à titre indicatif, le sablage, le grenailage, etc.

Il faut noter tout de même que dans ces applications, le frottement n'est pas mis en œuvre avec comme objectif le contrôle structural comme il l'est dans cette étude.

42. Constatation expérimentale

Dans la réalité, on observe le frottement à sec dans de nombreux systèmes mécaniques et systèmes structuraux de génie civil. En laboratoire, il peut être constaté lors d'expériences très simples et classiques.

Les exemples qui suivent illustrent quelques expériences où se trouve mis en jeu le frottement à sec.

Exemple 1 : Soit un corps quelconque, *gisant* ($v_0 = 0$) sur un plan horizontal; par exemple, un boîte parallélépipédique massive sur la surface d'une table, mais à la boîte, est fixé un fil maintenu horizontalement par l'expérimentateur (voir figure 3.3).

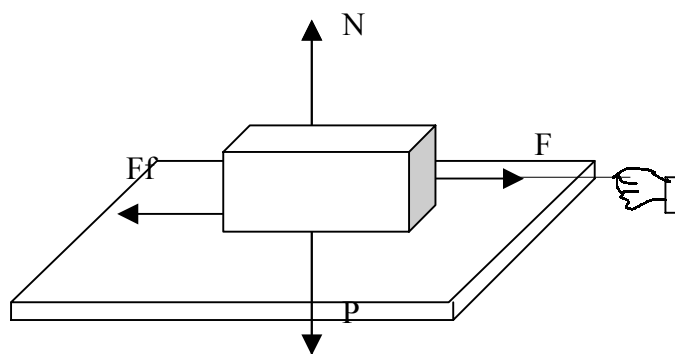


Fig. 3.3 : Frottement statique.

L'expérimentateur tire sur le fil en exerçant une force de traction plus ou moins faible. On constate que le boîte ne cède pas. Elle reste au repos. En vertu de l'un des principes fondamentaux de la statique, à savoir le principe de l'action mutuelle ou principe de l'action et de la réaction, on en déduit qu'il y a une force horizontale qui s'oppose à la force de traction appliquée sur le fil. La force de pesanteur et la force de réaction de la table, étant verticales, de même intensité mais de sens opposé, elles s'équilibrent mutuellement et ne produisent aucune influence dans le plan horizontal. Aussi est-il légitime de se poser la question au sujet de la nature de cette force horizontale qui s'oppose à la force de traction extérieure. La réponse est qu'il s'agit d'**une force de frottement** de la boîte sur la table.

Exemple 2 : Soit un corps quelconque, *lancé* ($v_0 \neq 0$) par un expérimentateur sur un plan horizontal; par exemple, la boîte et la table du précédent exemple.

On observe d'abord que la boîte glisse sur la table, puis l'on constate au bout d'un certain temps que son mouvement ralentit progressivement et enfin qu'elle s'arrête. On déduit de cette constatation, que la vitesse acquise initialement par la boîte diminue au cours du temps et que son accélération est de sens opposé à la vitesse. Cette perte de quantité de mouvement indique qu'il y a une force qui s'oppose au mouvement. Là aussi, il est légitime de se poser la question au sujet de la nature de cette force qui imprime cette accélération à la boîte. Une fois de plus, il s'agit essentiellement d'**une force de frottement** de la boîte sur la table et, à un degré moindre, de celle de la boîte contre l'air dans lequel elle baigne mais qui peut être considérée comme négligeable dans le cas de cet exemple.

43. Caractérisation et natures des forces de frottement à sec

431. Caractères des forces de frottement a sec.

Du point de vue de son action sur les corps solides où elle se manifeste, la force de frottement à sec ne diffère pas des autres forces telles que

- les forces de gravité, par exemple, le poids propre des corps.
- les pressions des corps solides ou fluides, par exemple celles produites par l'action du vent sur les constructions.
- les influences des déformations, par exemple celles des dilatations ou des tassements différentiels, etc.

En revanche, sous d'autres points de vue, elle s'en distingue nettement et elle présente des caractères particuliers.

Dans le cas de l'exemple 1 cité plus haut, la force de frottement est de même direction que la traction dans le fil, de même intensité mais de sens opposé à celle-ci. Dans ce cas, il n'y a pas de mouvement de corps et par conséquent, il n'y a pas de travail mécanique ni de transformation d'énergie d'une forme en une autre.

Dans celui de l'exemple 2, la force de frottement est dirigée dans la même direction que la vitesse du corps lancé mais de sens opposé à celle-ci. Son action étant liée à la transformation de l'énergie cinétique en chaleur et comme c'est le déplacement qui définit l'orientation de la vitesse, le déplacement et la force de frottement sont donc de sens opposés et, par conséquent, le travail de la force de frottement est négatif. L'énergie émane donc du corps sollicité par la force de frottement. L'énergie cinétique diminue toujours quand le corps n'est soumis qu'à la force de frottement. En effet, pour le corps de masse m se déplaçant à la vitesse v , d'après la seconde loi de la dynamique on a

$$m \cdot dv/dt = - F_f \quad (3.3)$$

Où F_f est la force de frottement.

En multipliant par dS , on obtient,

$$d((m \cdot v^2) / 2) = - F_f \cdot ds. \quad (3.4)$$

Cette expression signifie que la diminution de l'énergie cinétique est égale au travail de la force de frottement. L'observation (contact tactile, par exemple) du système composé du corps mobile et de la table prouve que l'énergie cinétique (mouvement) a été effectivement transformée en énergie thermique (chaleur).

432. Nature des forces de frottement à sec.

Les forces de frottement évoquées ci-dessus ont des caractères similaires d'où cette dénomination unique de forces de frottement à sec, dans les 2 cas; mais par contre, leurs natures sont différentes.

Dans le premier cas, la force de frottement se manifeste au repos. Elle est subséquente à la force extérieure de traction appliquée au corps. Cette force est de nature statique et est appelée force de frottement de repos ou force de frottement statique.

Dans le deuxième exemple, le frottement se manifeste en cours et par suite du mouvement. Il lui est naturellement co-existant. La force de frottement qui y apparaît est

par contre de nature dynamique. Elle est dite force de frottement de glissement ou force de frottement dynamique.

Le frottement à sec peut donc engendrer aussi bien des forces de frottement statiques (ou forces de frottement de repos) que des forces de frottement dynamiques (ou forces de frottement de glissement).

44. Mécanismes du frottement à sec

A ce jour, aucune théorie rigoureuse des lois régissant le frottement à sec des surfaces de corps solides en contact n'a été établie. Le phénomène est plutôt complexe et dépend de nombreux facteurs tels que l'état et la nature des surfaces des corps en contact. Cependant, il est possible de se faire une représentation des mécanismes qui sont à la base du phénomène.

A une échelle microscopique, le frottement peut s'expliquer par l'état des surfaces des corps en contact. La figure 3.4, montre, à une échelle volontairement exagérée, le profil tourmenté des surfaces de contact de deux corps solides, profil que l'on considère à l'échelle macroscopique abusivement comme plan et lisse. La surface d'un corps n'est jamais une surface parfaitement lisse; elle présente toujours, par rapport à un plan moyen, des imperfections géométriques; des aspérités *i.e.* des saillies et des creux, se succédant de façon irrégulière et dont les dimensions sont variables dans certaines limites. Lors de la mise en contact des deux corps, les saillies d'un corps pénètrent dans les creux de l'autre, créant ainsi un effet de butées micrométriques. Certaines saillies se déforment plus ou moins, leur déformation dépendant de la pression locale (et, évidemment, de la pression moyenne suivant la surface de contact) et par suite, pouvant être de nature élastique ou inélastique.

Au repos, lorsqu'une force extérieure est appliquée à l'un des corps, des composantes tangentielles de l'effet de butées et de l'influence des déformations des saillies apparaissent, équilibrent la force extérieure et engendrent ainsi, la force de frottement statique. Sur la figure 3.4 est représenté de façon schématique, le mode de formation des forces de frottement statique: si une force extérieure F est appliquée sur le corps A, dans les zones voisines des points de contact a, b, c, ... apparaissent des forces tangentielles f_a, f_b, f_c, \dots équilibrant la force F et dont la résultante constitue la force de frottement de repos. Pour des raisons de clarté, les forces f_a, f_b et f_c ont été représentées en haut du dessin.

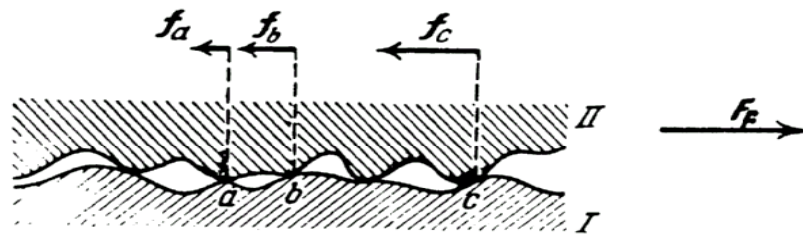


Fig. 3.4 : Mécanisme microscopique du frottement.

Il est admis également qu'au cours du mouvement relatif des deux corps, les irrégularités des deux corps s'engrènent aussi, mais en outre s'entrechoquent. Les forces développées lors de ces engrènements et de ces chocs donnent, après sommation, la force de frottement de glissement.

Le frottement peut s'expliquer d'une façon complémentaire par la nature des surfaces en contact. En fait, un autre mécanisme d'échelle moléculaire (ou échelle submicroscopique) se superpose au précédent mécanisme d'échelle microscopique. On peut admettre que les disparités chaotiques des molécules à la surface des corps jouent vis à vis du frottement un rôle identique aux saillies et aux creux des surfaces. En effet, les interactions entre les molécules de surface des deux corps, qu'on mentionne parfois sous le nom de cohésion ou d'adhérence selon que les deux corps en contact sont constitués de matériaux identiques ou différents, sont une cause complémentaire du frottement. S'il est possible de fournir une explication des mécanismes qui sont sous jacents au phénomène de frottement, il n'y a par contre aucune loi qui rend compte de la valeur de la force de frottement. Il est bien entendu impossible de tenir compte de toutes ces composantes de butée et de toutes ces interactions moléculaires de façon individuelles; elles sont donc déterminées de façon collective et leur influence est représentée approximativement par un coefficient dit coefficient de frottement.

Le frottement est donc une notion statistique et la force de frottement F_f est représentative de la somme d'un grand nombre de forces horizontales de butées à laquelle se rajoute la somme d'un nombre indéterminé d'interactions entre les molécules des deux corps en contact [Alonso et Fin 1970]. Son influence est prise en compte par l'introduction d'un coefficient dit coefficient de frottement et noté habituellement par μ .

45. Détermination du coefficient de frottement de repos

Comme il a été déjà mentionné plus haut, une force horizontale F suffisamment petite, appliquée au corps gisant sur une surface horizontale lisse ne peut pas le déplacer

car il apparaît une force de frottement de repos F_f , égale et opposée à la force appliquée F . Cette force F_f peut être déterminée en rapport à la force appliquée F ; *i.e* en faisant varier la tension de la ficelle, on modifie simultanément la force de frottement. En augmentant la tension, on fait croître par la même occasion la force de frottement; en changeant la direction de la force F , on modifie la direction de la force de frottement.

Mais en augmentant progressivement la force appliquée F , on finit par provoquer le mouvement. Des expériences simples montrent que le corps acquiert une accélération si la force F dépasse une valeur déterminée F_0 ; la force de frottement de repos peut donc prendre toutes les valeurs de 0 à F_0 , ou ce qui signifie encore que la force de frottement de repos a une valeur maximale F_0 .

Si $F > F_0$, le corps acquiert une accélération et est capable de se mouvoir; si $F < F_0$ l'accélération du corps est nulle et le corps est au repos, la force de frottement est égale à F .

La valeur absolue de la force de frottement de repos maximale F_0 est fonction des propriétés physiques des corps dont les surfaces sont en contact, de l'état des surfaces (les surfaces rugueuses opposent une résistance plus grande que les surfaces lisses, la force de frottement de repos maximale croît en conséquence) et de la force de pression maintenant un corps contre l'autre.

Il est possible de vérifier expérimentalement que la force de frottement F_0 a une valeur telle que pour la plupart des applications, elle peut être considérée comme proportionnelle à la force normale N plaquant les 2 corps l'un sur l'autre. La constante de proportionnalité est appelée coefficient de frottement et désignée par μ .

Les premières expériences du genre furent menées par Amenton et lui permirent d'établir en 1699, la relation donnant la force de frottement maximale F_0 , dite relation d'Amenton et exprimée comme suit :

$$F_0 = \mu \cdot N \quad (3.5)$$

Où μ est le coefficient de la force de frottement de repos, ne dépendant que des propriétés des surfaces en contact. C'est un coefficient sans dimension.

La valeur du coefficient de frottement μ peut être déterminée par diverses expériences comme, par exemple, les expériences de glissement d'un corps sur un plan incliné. Dans cette expérience, on détermine l'angle de pente du plan déclenchant le glissement du corps sur le plan. Supposant que sur le plan gît un corps maintenu par la force de frottement F_f (voir figure 3.5).

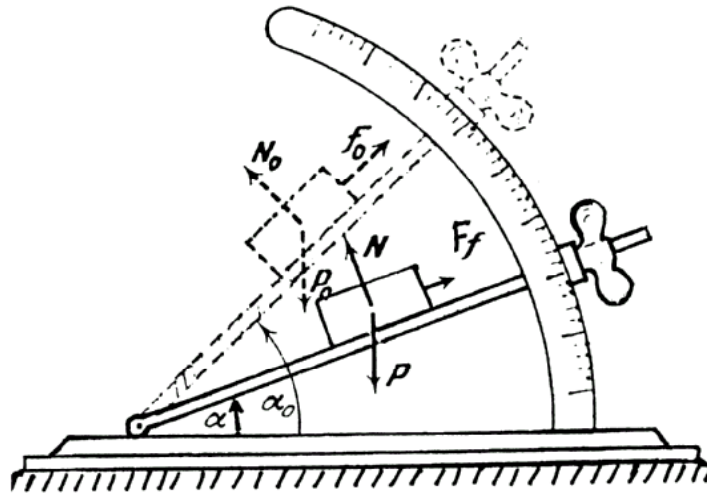


Fig. 3.5 : Détermination expérimentale du coefficient de frottement.

Il est évident que la force de frottement F_f empêchant le corps de glisser est égale à

$$F_f = P \cdot \sin \alpha \quad (3.6)$$

Si l'on augmente l'angle α , l'on observe que pour une de ses valeurs, notée α_0 , le corps commence à glisser. La somme des forces P_0 , N_0 , F_0 étant nulle, l'angle entre P_0 et N_0 est égal à $(180^\circ - \alpha_0)$, on a donc

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = F_0 / N_0 \quad (3.7)$$

Or l'on sait que $f_0 = \mu \cdot N_0$, il en découle

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha_0 \quad (3.8)$$

On en déduit donc que le coefficient de frottement de repos maximal est égal à la tangente de l'angle pour lequel commence le glissement du corps sur le plan incliné.

4.6 Frottement de glissement.

En général, il y a 2 sortes de coefficient de frottement. Premièrement, le coefficient frottement statique ou de repos est celui qui multiplié par la force normale donne la force minimum nécessaire pour mettre en mouvement relatif les 2 corps qui initialement sont en contact et immobiles l'un par rapport à l'autre. Deuxièmement, le coefficient de frottement dynamique ou de glissement est celui qui multiplié par la force normale, donne la force nécessaire pour maintenir les 2 corps en mouvement relatif uniforme.

Expérimentalement, il a été montré que le coefficient de frottement statique est toujours plus grand que le coefficient de frottement de glissement pour tous les

matériaux testés à ce jour. Il en est de même des forces de frottement correspondantes, i.e. la force de frottement statique est toujours plus grande que la force de frottement de glissement.

Dans le cas général d'un corps quelconque gisant sur une surface horizontale, quand la force extérieure appliquée au corps dépasse la force de frottement de repos, le corps acquiert une accélération et commence à glisser. La vitesse du corps augmente. On observe que la variation de la force de frottement de glissement en fonction de la vitesse du corps suit la courbe donnée sur la figure 3.6.

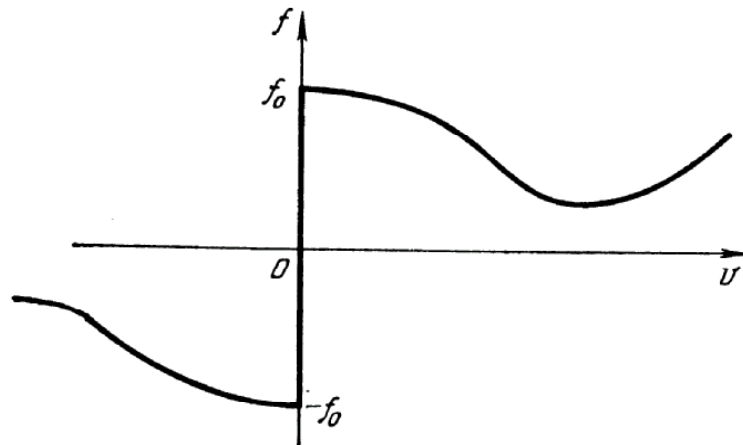


Fig. 3.6 : Force de glissement : cas général

Quand la vitesse est nulle, c'est à dire au repos, la force de frottement de glissement peut prendre toutes les valeurs de $-F_0$ à $+F_0$. Pour des vitesses voisines de zéro, la force de glissement commence d'abord par chuter, quand la vitesse augmente la force de glissement ensuite elle croît lentement.

Pour des corps en contact de nature différente, les courbes donnant la force de frottement de glissement sont différentes.

Pour des surfaces métalliques sèches et pour des vitesses de glissement du corps relativement faibles, on observe que la force de frottement de glissement ne dépend pas de la valeur de la vitesse du corps. Quand la vitesse est nulle, la force de frottement de glissement prend toutes les valeurs comprises entre $-F_0$ et $+F_0$. Pour des vitesses voisines de zéro, la force de glissement diminue. Quand la vitesse augmente, la force de glissement prend une valeur constante, inférieure à la force de frottement de repos maximale et prend un signe toujours opposé à celui de la vitesse comme montré sur la figure 3.7.

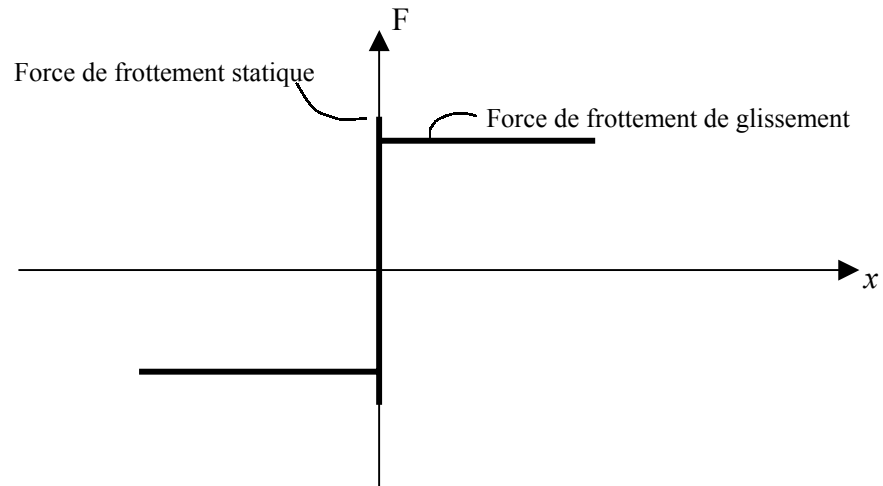


Fig. 3.7 : Modèle de Coulomb.

Le modèle donnant la force de frottement de glissement de corps métalliques et illustré sur la figure 3.7 est appelé modèle de Coulomb.

Dans le cas de la présente étude, le dissipateur d'énergie en question met en œuvre le frottement à sec de surfaces métalliques. La loi régissant la force de frottement de l'amortisseur est donc une loi de Coulomb [Lévy et Wilkinson 1976].

Pour faciliter le traitement numérique, Tou et Schulteiss ont développé un modèle introduisant 2 ressorts locaux de raideurs k_f et k_s comme le montre la figure 3.8.

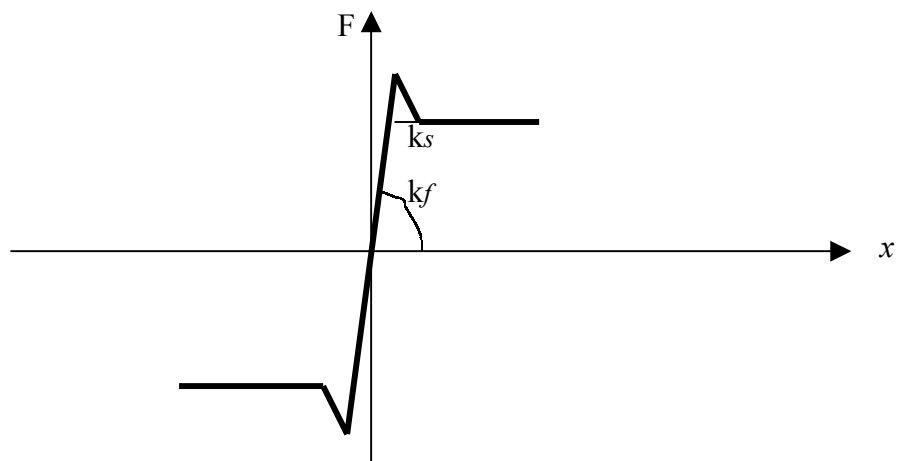


Fig. 3.8 : Modèle de la force de glissement.

Dans les modèles cités précédemment et décrivant la variation de la force de glissement de surfaces sèches en contact de 2 corps en mouvement relatif, la force extérieure, appliquée à l'un quelconque des 2 corps, est supposée croissante ou

décroissante mais monotone. Pour un chargement cyclique alterné (cycles de chargements et de déchargement répétés), comme dans le cas du dissipateur sous forces sismiques de notre étude, le tracé du modèle est légèrement différent. Il sera examiné dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE
4**

**CARACTERISTIQUES DU
DISSIPATEUR ISOLE**

I. GENERALITES

Plusieurs dissipateurs d'énergie par frottement à sec ont été conçus, étudiés et développés à ce jour. Dans le cas du présent projet, une technologie particulière d'un dissipateur mettant en œuvre le frottement à sec dans une conception originale, est étudiée. Cette technologie a été conçue et développée dans le cadre d'un projet de recherche mené par un bureau de recherche et d'ingénierie japonais, Nikken Sekkei, en collaboration avec Sumitomo Métal Industries Ltd. Le présent travail a été entamé par l'auteur de ce rapport, dans le cadre de ce projet de recherche, auquel il a participé en qualité d'étudiant du B.R.I / I. I. S. E. E., Building Research Institute / International Institute of Sismology and Earthquake Engineering, pour préparer une thèse de post graduation en génie sismique.

L'incorporation de l'organe dissipateur, support de cette technologie, à l'intérieur d'une structure de bâtiment est projetée en vue d'améliorer la performance dynamique de cette dernière en absorbant et dissipant sous forme de chaleur, grâce au frottement à sec, une proportion considérable de l'énergie introduite dans le bâtiment par le mouvement sismique du sol.

Une étude du dissipateur, aboutissant à un dimensionnement optimal a été d'abord menée. Ensuite, un prototype du dissipateur a été fabriqué.

Pour interpréter correctement et pour discuter les résultats expérimentaux qui seront obtenus à l'issue des essais de structures équipées de ce dissipateur ou ceux analytiques découlant d'une analyse de ces structures, il est nécessaire de connaître d'abord toutes

les propriétés dynamiques du dissipateur lui même. A cet effet, le dissipateur a été monté sur un banc d'essai et soumis à une série de tests.

Les propriétés mécaniques générales du frottement à sec de glissement mis en jeu par 2 corps métalliques quelconques en contact ont été examinées dans le précédent chapitre.

Dans le cas particulier de ce dissipateur d'énergie, des investigations complémentaires sont nécessaires pour déterminer les caractéristiques dynamiques spécifiques de ce dissipateur et pour examiner l'influence de certains aspects particuliers sur ces propriétés, telles que l'augmentation de la température des surfaces en contact, la valeur de la pulsation (vitesse angulaire) des vibrations excitatrices et le nombre de cycles de vibrations. Ces aspects représentent les conditions réelles d'utilisation les plus significatives en cours d'exploitation de bâtiments équipés du dispositif de dissipation.

Le dissipateur sera ensuite monté sur un modèle de structure élémentaire et testé en laboratoire pour étudier le comportement du système composé de la structure et du dissipateur à frottement et, en particulier, pour analyser la réponse de ce système sous différentes conditions de chargement. A l'issue des divers tests et essais et après les corrections qui s'imposent, des dissipateurs similaires à celui ayant été soumis aux essais seront fabriqués et montés enfin sur les structures réelles destinées à être dotées du contrôle structural.

La description et le fonctionnement du dissipateur d'énergie, la procédure d'essai et les résultats principaux obtenus à l'issue d'une série d'essais menés pour déterminer les caractéristiques du dissipateur sont reportés dans les paragraphes qui suivent.

II. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DU DISSIPATEUR

21. Description et montage du dissipateur.

L'amortisseur se compose, comme illustré sur la figure 4.1, d'un ensemble de pièces dont:

- Un corps cylindrique creux en acier, muni en l'un de ses bouts d'un moyeu de fixation et ouvert de l'autre mais devant recevoir un couvercle de fermeture amovible. La surface intérieure du cylindre constitue l'une des surfaces de contact où sera mis en oeuvre le frottement à sec de coulomb. Cette surface est préparée mécaniquement pour obtenir un coefficient de frottement élevé.

- Une tige cylindrique pleine en acier, munie à l'une de ses extrémités d'un moyeu de fixation similaire à celui du corps cylindrique. Sur le fût de la tige sont montés en file, dans l'ordre suivant, un écrou de réglage et un contre écrou de blocage, un premier groupe de pièces dit groupe frottant et constituant l'élément clé du dissipateur à frottement, des coupelles élastiques en acier traité, un deuxième groupe frottant et en bout un écrou bloqué et servant de butée à l'ensemble des pièces de la file. Les coupelles élastiques, grâce à leur forme fonctionnent comme des ressorts de compression.

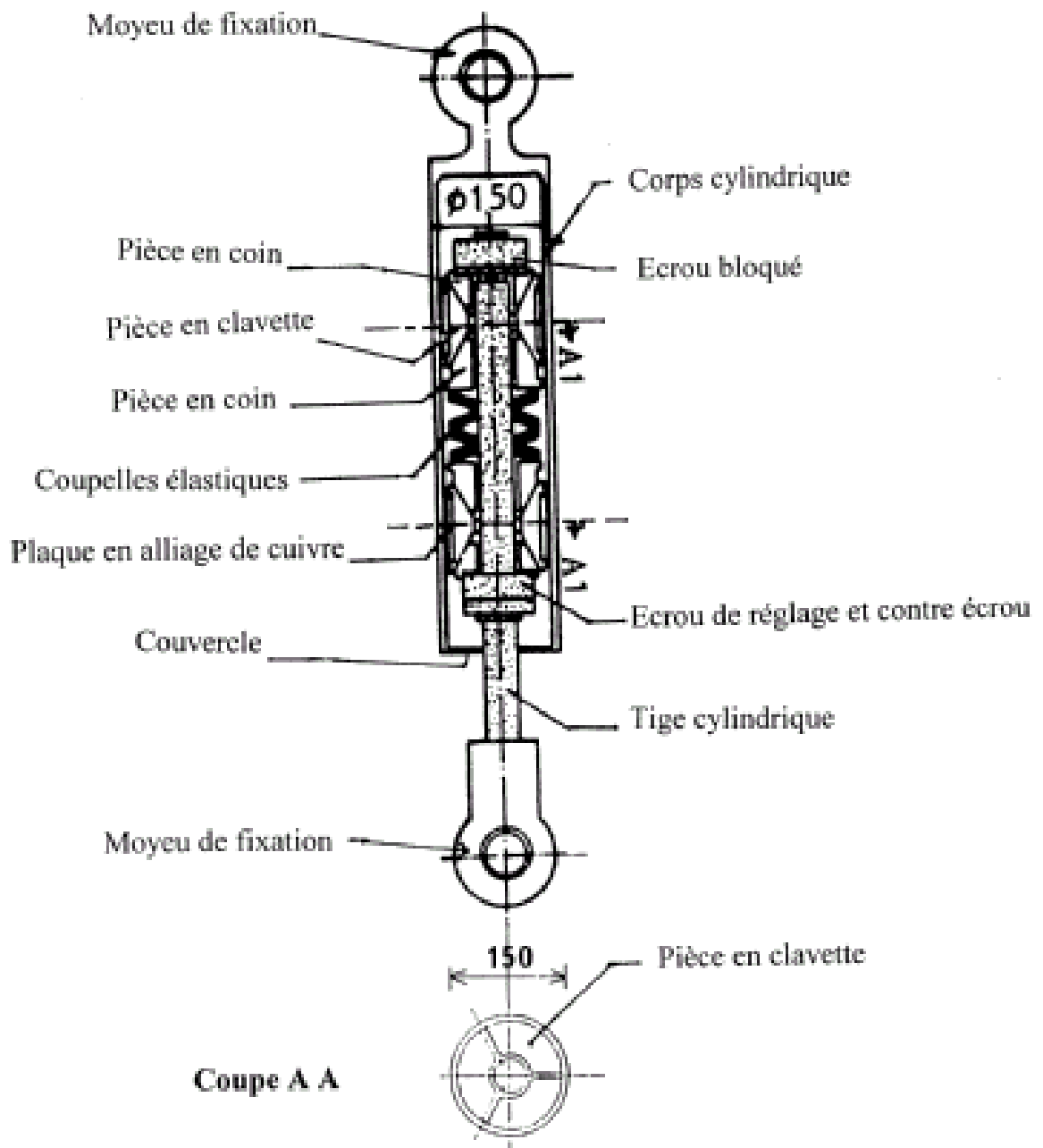


Fig. 4.1 : Schéma descriptif du dissipateur à frottement.

Chacun des 2 ensembles frottants se compose d'une paire de pièces, de forme en coin, dont les parties sont montées en sens opposés et entre lesquelles est intercalée une pièce, montée en clavette et divisée radialement en 3 parts égales. Un jeu suffisant est laissé entre les paires de pièces en coin leur permettant une liberté de déplacement dans la direction axiale. Sur la surface extérieure des parties de la pièce en clavette, sont serties des plaques dont la face extérieure, constitue la seconde surface de frottement qui vient au contact de la surface intérieure du corps cylindrique. Ces plaques sont en alliage de cuivre auquel il a été additionné, au moment de l'élaboration, des grains de graphite pour donner un maximum de stabilité au coefficient de frottement et pour prévenir l'apparition de bruit anormal lors de la mise en opération du dissipateur.

La tige et les divers éléments montés en file sont introduits dans le creux du corps cylindrique. Le couvercle, mis en place en phase ultime, permet la fermeture du cylindre creux et assure l'étanchéité du mécanisme.

22. Fonctionnement du dissipateur.

Chaque fois qu'un couple de serrage est appliqué sur l'écrou de réglage, les coupelles élastiques agissent, grâce à la raideur que leur confère leur forme, en exerçant une pression de part et d'autre, sur les paires de pièces en coin, entraînant ainsi le rapprochement des éléments de chaque paire, rapprochement rendu possible par le jeu axial prévu à cet effet. Ce rapprochement axial entraîne, grâce à la forme inclinée des pièces en coin, l'expansion radiale des 3 parties de la pièce en clavette qui viennent mettre en contact la surface des plaques en alliage de cuivre contre la surface intérieure du corps cylindrique. Si le couple de serrage est augmenté, il y a apparition d'une pression normale au niveau de l'interface cylindrique de contact du corps creux sur le groupe frottant.

En faisant varier la valeur du couple de serrage, il est ainsi possible de contrôler la valeur de la pression normale. Le coefficient de frottement étant constant, et en vertu de la formule reliant la force normale à la force de frottement, on peut par voie de conséquence, contrôler la valeur de la force de frottement de glissement nécessaire pour mettre en mouvement relatif de translation, la tige par rapport au corps creux du dissipateur. La valeur de la force de frottement de glissement du dissipateur dépend donc du couple de serrage du mécanisme.

Une fois que la force de frottement qui caractérise le dissipateur est déterminée, le couple de serrage nécessaire est appliqué par rotation de l'écrou de réglage et stabilisé par serrage du contre écrou de blocage.

III. ESSAIS DU DISSIPATEUR

31. Méthode d'essai

Pour déterminer les caractéristiques dynamiques du dissipateur d'énergie et étudier l'influence de certains facteurs sur ces caractéristiques, le dissipateur a été installé sur un banc d'essai et soumis à une série de tests.

Note : L'auteur a assisté et a suivi le déroulement d'une partie des tests expérimentaux effectués et a participé à l'exploitation des résultats obtenus, grâce au concours de M. Terramoto, chef du Département Structures de Nikken Sekkei.

Le banc se compose, comme illustré sur la figure 4.2, d'un socle massif comportant une pièce rigide en console verticale, placée en un bout du banc et servant d'appui fixe au dissipateur (le dissipateur y est assemblé par l'intermédiaire du moyeu de fixation du corps cylindrique) et d'une seconde pièce rigide en console verticale réglable et équipée de roulement à billes, dans lesquelles coulisse une tige de chargement, fixée d'un coté au second moyeu du dissipateur (coté tige) et de l'autre à un vérin hydraulique porté par un support rigide fixé sur le socle. Le vérin est branché sur une unité de régulation hydraulique qui assure le fonctionnement du vérin et qui permet de réguler l'amplitude, la fréquence et le nombre de cycles du chargement du vérin. L'unité peut être programmée pour générer des signaux de formes sinusoïdale, triangulaire, ou autres.

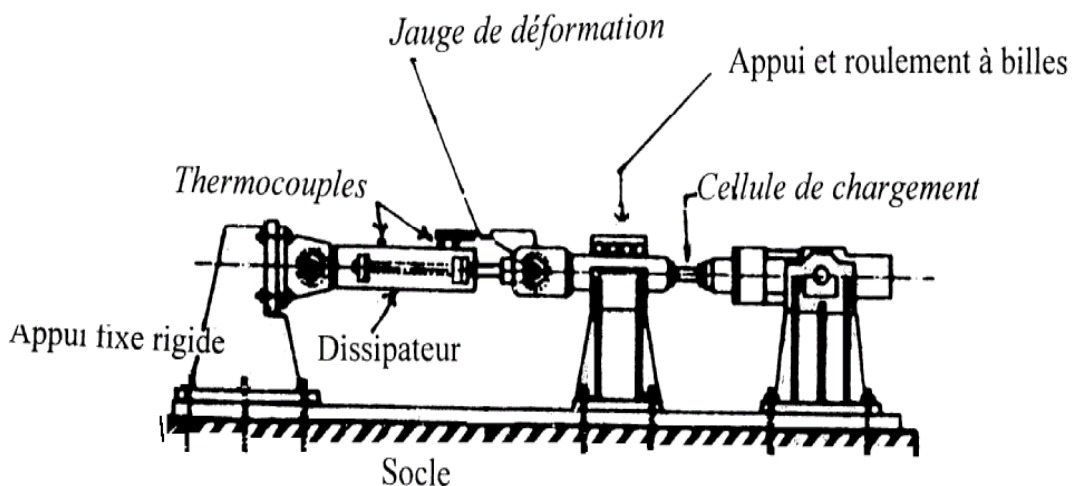


Fig. 4.2 : Dissipateur sur banc d'essai.

Dans le cadre du programme de chargement arrêté par l'équipe de recherche, le seul type de signal choisi est celui qui permet au vérin d'appliquer sur la tige du dissipateur, une force extérieure, périodique de forme sinusoïdale. Il a été jugé que les résultats obtenus sous une force sinusoïdale constitue une enveloppe des résultats que l'on obtiendrait sous des forces de forme quelconque.

L'instrumentation a consisté à placer sur le corps du dissipateur des thermocouples pour mesurer la température qui résulte de son échauffement par l'énergie thermique de transformation, à placer des jauges de déformation entre la tige et le corps du dissipateur pour mesurer le déplacement ou course de la tige du dissipateur et à placer des cellules de chargement au niveau de la fixation de la tige du dissipateur sur le vérin pour mesurer la force de frottement du dissipateur. Les signaux mesurés sont systématiquement envoyés à un analyseur de signaux qui permet de visualiser (voir figure 4.3) le chargement et la valeur de la force de frottement au cours du temps.

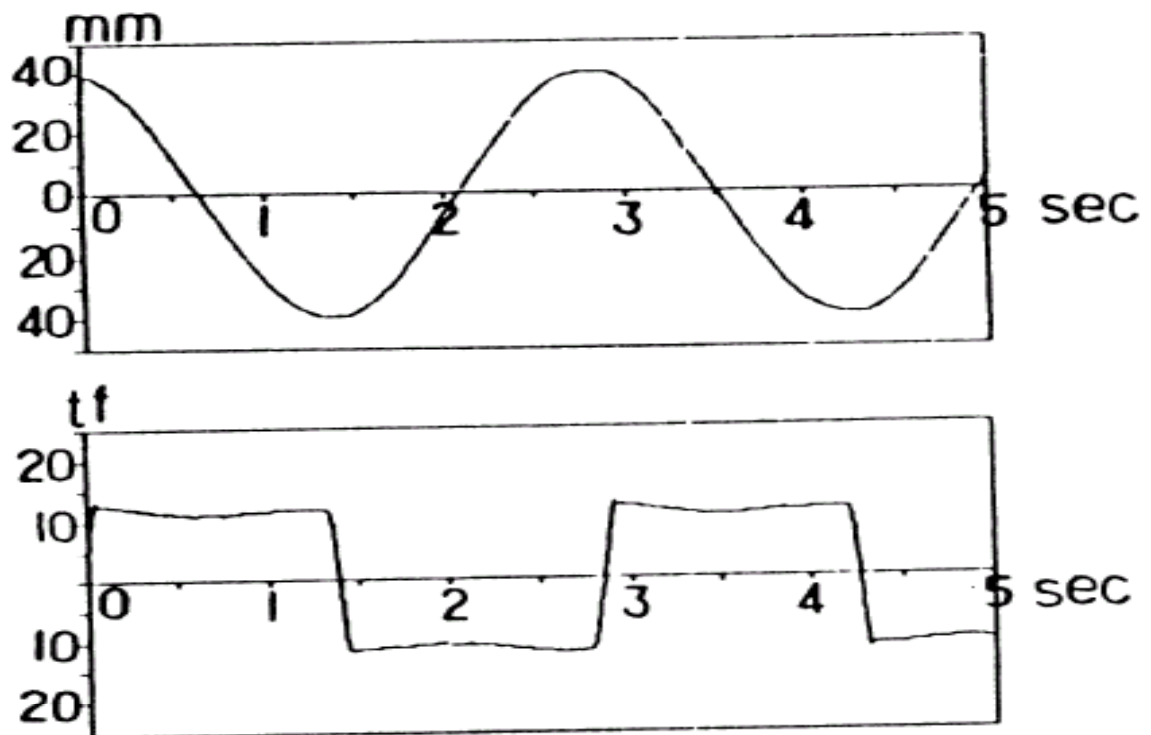


Fig. 4.3 : Variation de la force de frottement sous chargement sinusoïdale.

L'analyseur permet de visualiser également le tracé de la courbe caractéristique "force-déplacement" du dissipateur qui forme des boucles d'hystérésis dont l'aire de chacune d'elle, indique la quantité d'énergie dissipée au cours d'un cycle de charge.

32. Programme d'essai

Les essais du dissipateur proprement dit n'ont débuté qu'après des opérations de rodage du système et d'ajustement des conditions initiales de l'interface de frottement. Un mouvement vibratoire sinusoïdale de 750 cycles ayant une amplitude de 1 mm et une fréquence de 1Hz a été appliqué au dissipateur pour mener à terme ces opérations préliminaires.

Ensuite, des mouvements vibratoires de forme sinusoïdale dont les paramètres sont indiqués dans le tableau 4.1, ont été appliqués au dissipateur dans le cadre des essais du dissipateur.

Amplitude Δ en mm	Fréquence f en Hz	Vitesse V en cm / s *	Nombre de cycles N150 **
1	1	0.63	15 000
3	0.33	0.63	
5	5	15.71	250
10	0.33	2.09	
10	1	6.28	550
10	2	12.57	270
20	0.2	2.51	700
20	0.33	4.19	
20	0.5	6.28	500
20	2	25.13	
30	0.33	6.28	
38	0.33	8.38	350

* Vitesse correspondant à la position 0 du déplacement de glissement.

** Nombre de cycles pour lequel la température du dissipateur atteint 150°.

Tableau 4.1 : Programme de chargements sur dissipateur isolé.

33. Résultats obtenus

Les principaux résultats expérimentaux obtenus à l'issue des essais sur dissipateur ainsi que leurs interprétations sont rapportés ci après.

1. Choc dynamique.

Une légère chute de la valeur de la force de frottement a été observée, au moment où l'ensemble frottant commence à glisser. La force de frottement statique maximale est donc légèrement supérieure à la force de frottement de glissement comme on peut le constater sur la figure 4.4.

Ce phénomène appelé parfois choc dynamique, déjà abordé dans le chapitre précédent,

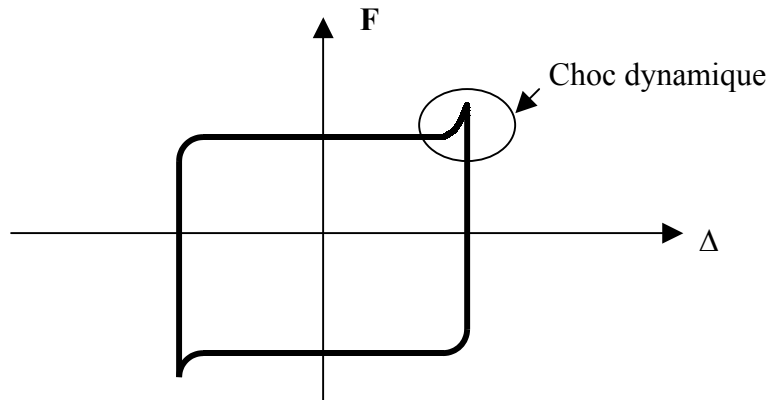


Fig. 4.4: Choc dynamique.

peut être considéré comme transitoire se manifestant très brièvement lorsque la force de frottement change de nature et passe de sa nature statique à une nature dynamique.

2. Effets de la vitesse sur les propriétés du dissipateur

L'influence de la vitesse sur la force de frottement du dissipateur peut être observée sur la figure 4.5. Il en ressort que quand la vitesse augmente, la force de frottement statique maximale augmente par contre la force de frottement de glissement diminue légèrement, faisant que les boucles d'hystérésis décrivant la courbe caractéristique "force-déplacement" du dissipateur change de forme et passe d'une forme rectangulaire pour les petites vitesses à une forme de plus en plus concave au fur et à mesure que la vitesse augmente.

- 1: $d = 10 \text{ mm}$, $V = 2.1 \text{ cm/s}$
- 2: $d = 20 \text{ mm}$, $V = 4.2 \text{ cm/s}$
- 3: $d = 30 \text{ mm}$, $V = 6.3 \text{ cm/s}$
- 4: $d = 40 \text{ mm}$, $V = 8.0 \text{ cm/s}$
($f = 0.33 \text{ Hz}$)

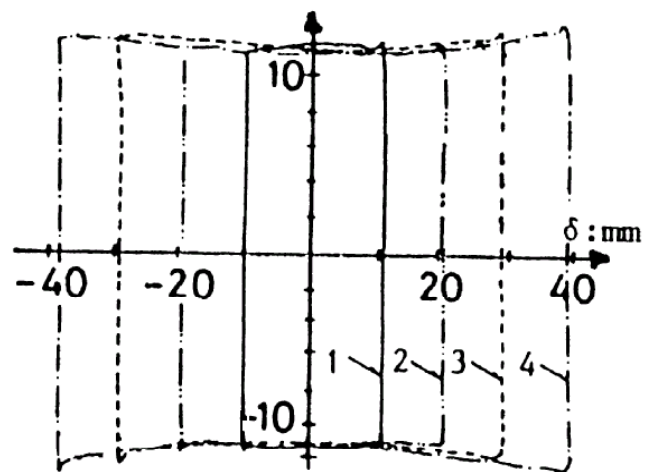


Fig. 4.5 : Effet de la vitesse de chargement sur la courbe caractéristique.

Il est cependant possible de considérer que l'influence de l'augmentation de la vitesses de frottement statique et celle de la diminution de la vitesse de frottement de glissement se neutralisent. On peut admettre que l'énergie dissipée en un cycle de vibration est proportionnelle au déplacement ou course du dissipateur et ne dépend pas de la vitesse, comme on peut le constater sur la figure 4.6.

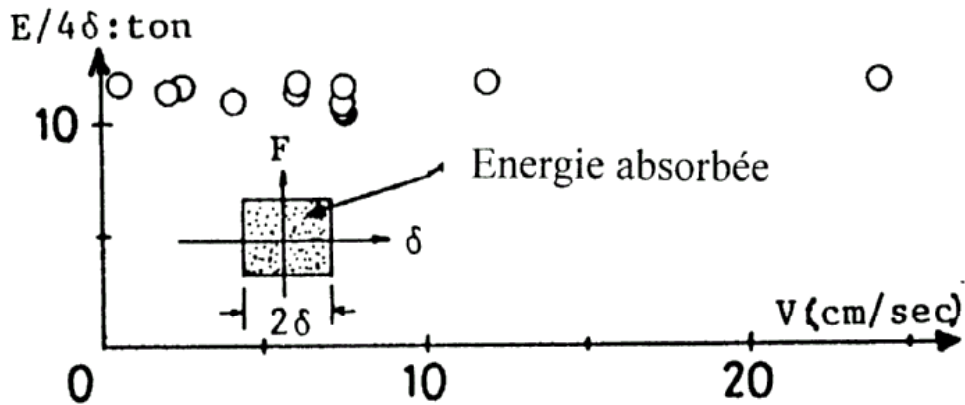


Fig. 4.6 : Energie dissipée en fonction de la vitesse.

3. Effets de la température de l'ensemble frottant sur les propriétés du dissipateur.

L'effet de la température de l'ensemble frottant sur les caractéristiques de la force de rappel sont montrés sur la figure 4.7. L'augmentation de la température est causée par la chaleur produite à l'interface de frottement lors de la conversion de l'énergie cinétique ou de mouvement en énergie thermique. Il est évident que quand la température des surfaces en contact augmente, la force de frottement statique augmente faiblement et la force de frottement de glissement chute légèrement.

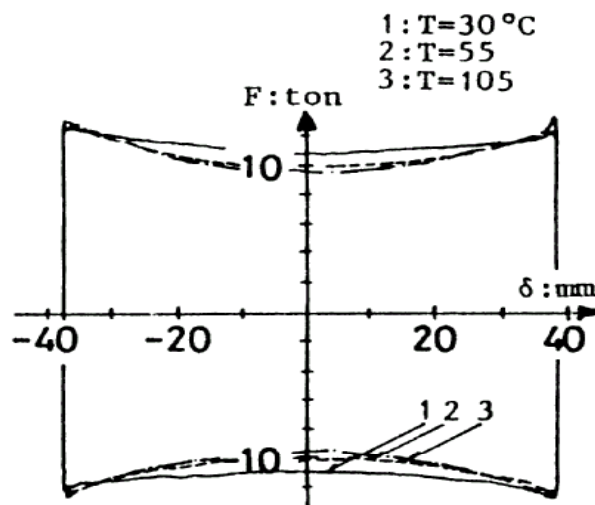


Fig. 4.7 : Effet de la température sur la courbe caractéristique.

La quantité d'énergie par cycle diminue également quand la température des surfaces frottante augmente, comme on peut l'observer sur la figure 4.8. Le taux relatif de cette diminution de l'énergie dissipée atteint approximativement 7% quand la température passe de 30° à 105°.

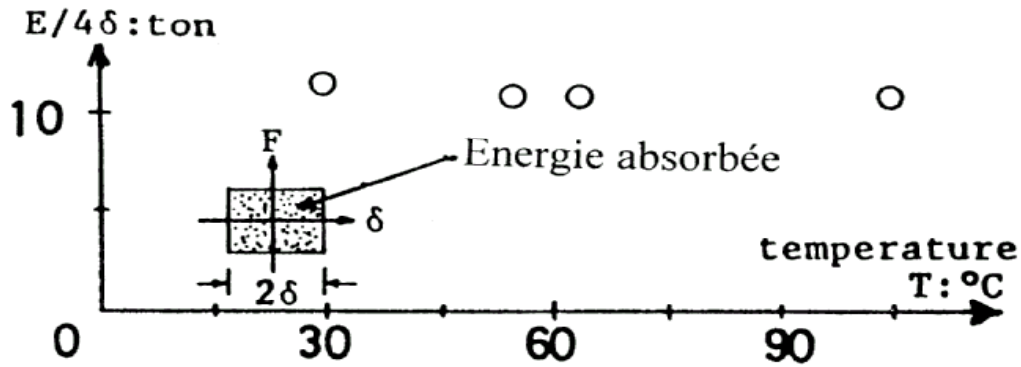


Fig. 4.8 : Energie dissipée en fonction de la température.

4. Effets du nombre de cycles.

En phase d'exploitation, les surfaces en contact du dissipateur subissent un grand nombre de cycles de chargement-déchargement pouvant affecter leurs propriétés. La durabilité ou la pérennité des propriétés des surfaces de contact peut être évaluée à partir du nombre de cycles N .

Les résultats des tests montrent que le nombre de cycles produit des effets sur les caractéristiques de la force de rappel du dissipateur. L'usure des surfaces de frottement a atteint un maximum de 0.1 mm sur le diamètre du corps du dissipateur après les nombreux essais et tests auxquels a été soumis le dissipateur totalisant quelques 20 000 cycles. En admettant qu'une usure de 0.1 mm entraîne une diminution de la valeur de la force de frottement de 3% selon des calculs, il est tout à fait justifié d'estimer que le dissipateur a une durabilité suffisante sous les conditions pratiques.

34. Discussions des résultats obtenus

Compte tenu des résultats obtenus et des interprétations faites et rapportées dans le paragraphe précédent, la conclusion qui s'impose est que les caractéristiques du dissipateur dépendent légèrement de la vitesse de vibration et de la température des

surfaces en contact. Cependant l'influence des effets observés sur le problème du, contrôle structural est tout à fait négligeable.

On peut donc adopter avec suffisamment de précision comme courbe caractéristique "force- déplacement" du dissipateur, un courbe enveloppe du type rigide plastique parfait, telle que représentée sur la figure 4.9 ci après.

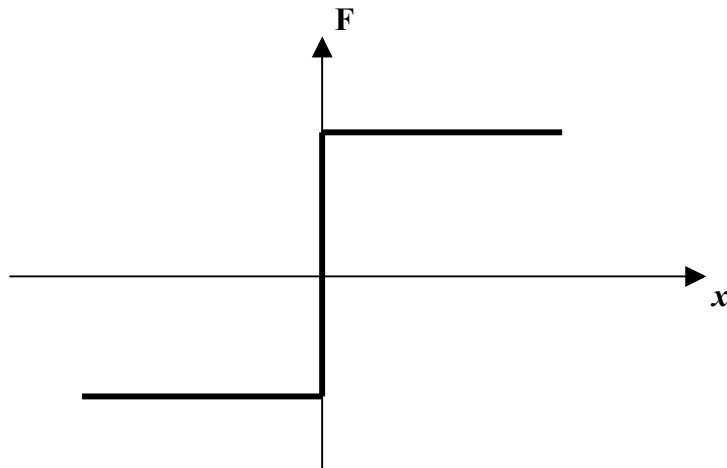


Fig. 4.9: Modèle de courbe caractéristique adopté.

Sous chargement dynamique alterné, cette courbe produit des boucles de forme rectangulaire ne dépendant que de la force de frottement et du déplacement mais ne dépendant ni de la vitesse ni de la température des surfaces de frottement.

**CHAPITRE
5**

**CARACTERISATION DU
DISSIPATEUR EN CONTEXTE**

I. INTRODUCTION

Après les essais effectués sur le dissipateur lui même, une série de tests portant sur une structure équipée d'un dissipateur d'énergie du type étudié précédemment a été effectuée. La structure testée est un cadre simple (à un niveau) en acier, représentatif de façon générale d'un étage de bâtiment et pouvant être modélisé comme une poutre cisailée à un degré de liberté. Les chargements appliqués lors des tests sont de 2 types; des chargements statiques et des chargements dynamiques.

Cette série de tests a été planifiée et exécutée dans le but d'examiner et de vérifier les performances du dissipateur dans des conditions similaires à celles existantes dans un environnement réel.

II. MONTAGE DE L'EXPERIENCE

Les tests se sont déroulés au laboratoire de recherche de Sumitomo Company. La structure testée est bidimensionnelle et se compose d'un cadre rigide, en acier de construction, comportant une poutre supérieure et une poutre inférieure représentatives d'un plancher bas et d'un plancher haut d'un étage de bâtiment ainsi que 2 poteaux et un panneau préfabriqué en béton armé. Les dimensions générales et les dimensions des éléments de la structure sont représentées sur la figure 5.2. Le cadre métallique est monté sur un banc d'essai et fixé rigidement à sa base de façon à empêcher toute liberté de mouvement de cette base. Le panneau préfabriqué en béton armé, d'épaisseur 15 cm,

supposé très rigide dans son plan, est installé à l'intérieur du cadre. Il est rendu solidaire de la poutre inférieure du cadre au moyen de 2 fixations, situées à sa base et suffisamment espacées. La partie haute du panneau est libre.

Un spécimen du dissipateur d'énergie, placé entre la poutre supérieure du cadre et la partie haute du panneau, fixé au moyens de platines de fixation, d'un coté en un point de la poutre supérieure et de l'autre en un point de la partie haute du panneau. Le dissipateur est installé de façon à ce que le déplacement inter planchers entraîne sa mise en opération. En d'autres termes, le terme de la réponse du système qui est sous contrôle dans ce cas est le déplacement inter planchers.

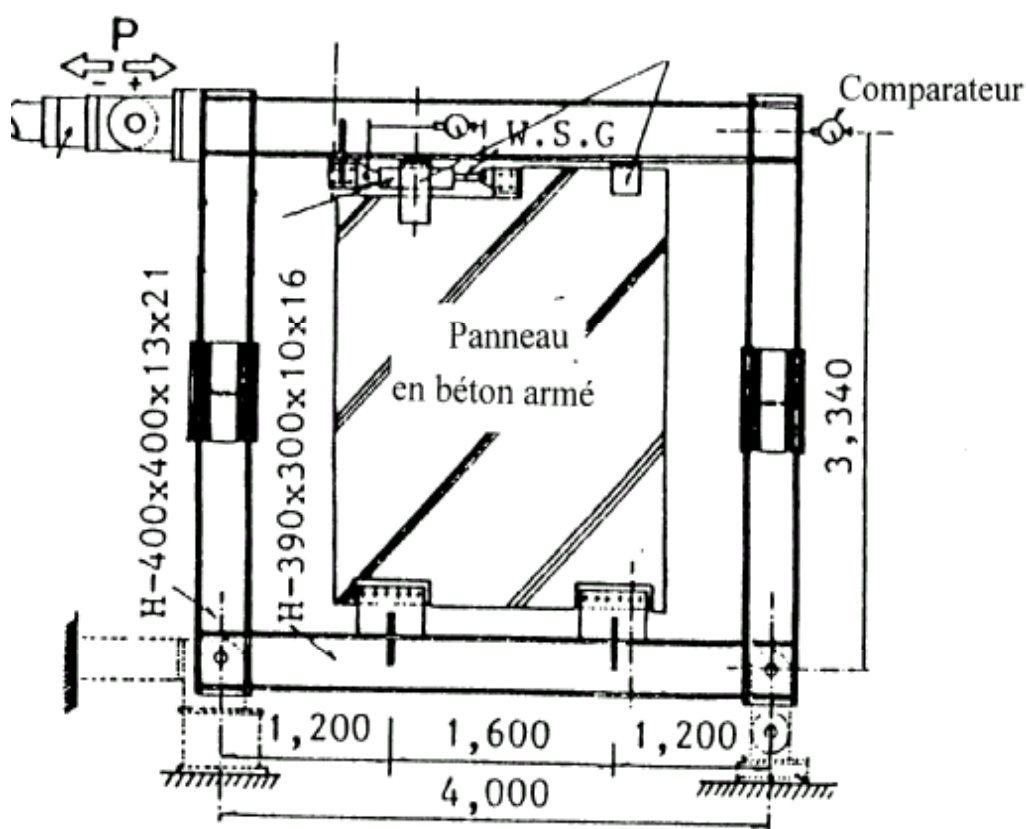


Fig. 5.1 : Test du dissipateur en contexte.

Le panneau étant rigide, ce point de fixation ne peut donc subir de déplacement relatif par rapport à la base du cadre (plancher bas) par contre l'autre point de fixation est solidaire du plancher haut (voir figure 7.2). Ce montage permet l'apparition de la

force de frottement dans le dissipateur via le panneau en béton dès qu'un déplacement relatif inter planchers (ou intra étage) tend à se manifester.

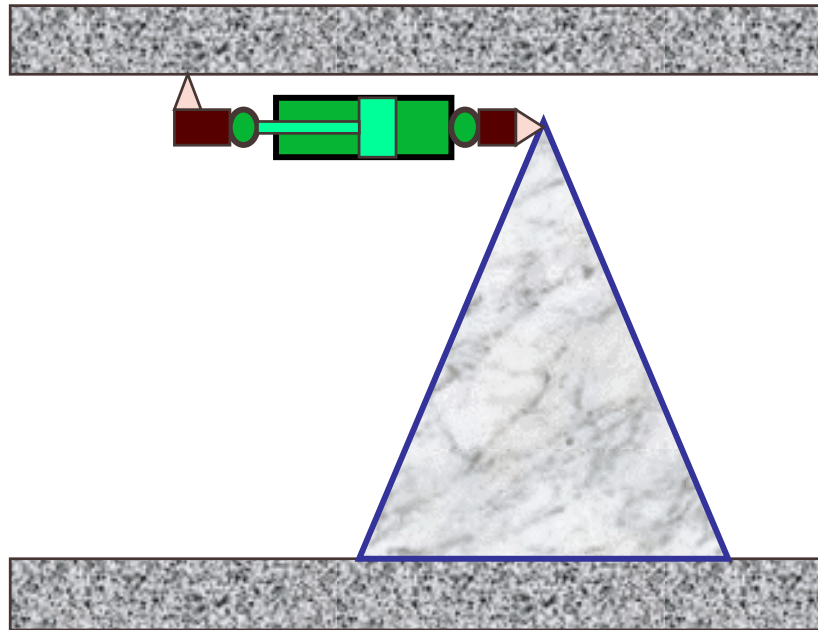


Fig. 5.2 : Stratégie d'installation.

En ce qui concerne le chargement, des forces statiques et des forces dynamiques extérieures sont appliquées en tête du cadre métallique au moyen d'un vérin hydraulique de forte capacité, contrôlé par une unité hydraulique.

Une jauge à cadran, placée en tête du cadre, est utilisée pour mesurer le déplacement inter planchers et le déplacement de glissement ou course du dissipateur. Une jauge de déformation est mise en place entre les 2 points de fixation du dissipateur pour mesurer le taux de déformation et la force de frottement.

III. PROGRAMME DE CHARGEMENTS

Le programme de chargements appliqués à la structure testée comprend 4 phases dont les contenus sont décrits dans le tableau 5.1.

Phase 1 : Application d'une force statique

Phase 2 : Application d'une force sinusoïdale

Phase 3 : Application d'une force statique

Phase 4 : Application d'une force sinusoïdale

Phase de chargement	Description du chargement										
<u>Phase 1</u> : Chargement statique	Une force P est appliquée en tête du cadre. Son intensité est lentement variée répétée. Sa valeur varie entre $- 50 \text{ tf}$ et $+ 50 \text{ tf}$.										
<u>Phase 2</u> : Chargement dynamique	Application d'une force vibratoire de forme sinusoïdale dont les paramètres sont : <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Fréquence f en Hz</th> <th>Amplitude δ en mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>± 2</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>± 5</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>± 10</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>± 15</td> </tr> </tbody> </table>	Fréquence f en Hz	Amplitude δ en mm	1	± 2	2	± 5	3	± 10	4	± 15
Fréquence f en Hz	Amplitude δ en mm										
1	± 2										
2	± 5										
3	± 10										
4	± 15										
<u>Phase 3</u> : Chargement statique	Application d'une force P statique dont on contrôle la course δ en le faisant varier de 0 à 60 mm par pas de 15 mm et P varie entre $\pm 60 \text{ tf}$.										
<u>Phase 4</u> : Chargement dynamique	Application d'une force vibratoire sinusoïdale dont les paramètres sont : <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Fréquence f en Hz</th> <th>Amplitude δ en mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>± 10</td> </tr> <tr> <td></td> <td>± 30</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>± 50</td> </tr> </tbody> </table>	Fréquence f en Hz	Amplitude δ en mm	3	± 10		± 30	5	± 50		
Fréquence f en Hz	Amplitude δ en mm										
3	± 10										
	± 30										
5	± 50										

Tableau 5.1 : Programme de chargements du dissipateur en contexte.

IV. RESULTATS OBTENUS

41. Résultats des tests sous chargements statiques

La courbe caractéristique du comportement du système testé (structure + dissipateur) obtenue à l'issue des phases de chargements statiques est rapportée sur la figure 5.3.

Il en ressort que malgré que la courbe caractéristique du dissipateur seul, est de forme rigide – plastique, la courbe caractéristique de l'ensemble du système est bilinéaire à cause de la flexibilité introduite par les supports et les fixations.

La courbe caractéristique du cadre seul est du type élastique. La courbe caractéristique du dissipateur seul est représentée sur la figure 5.4.

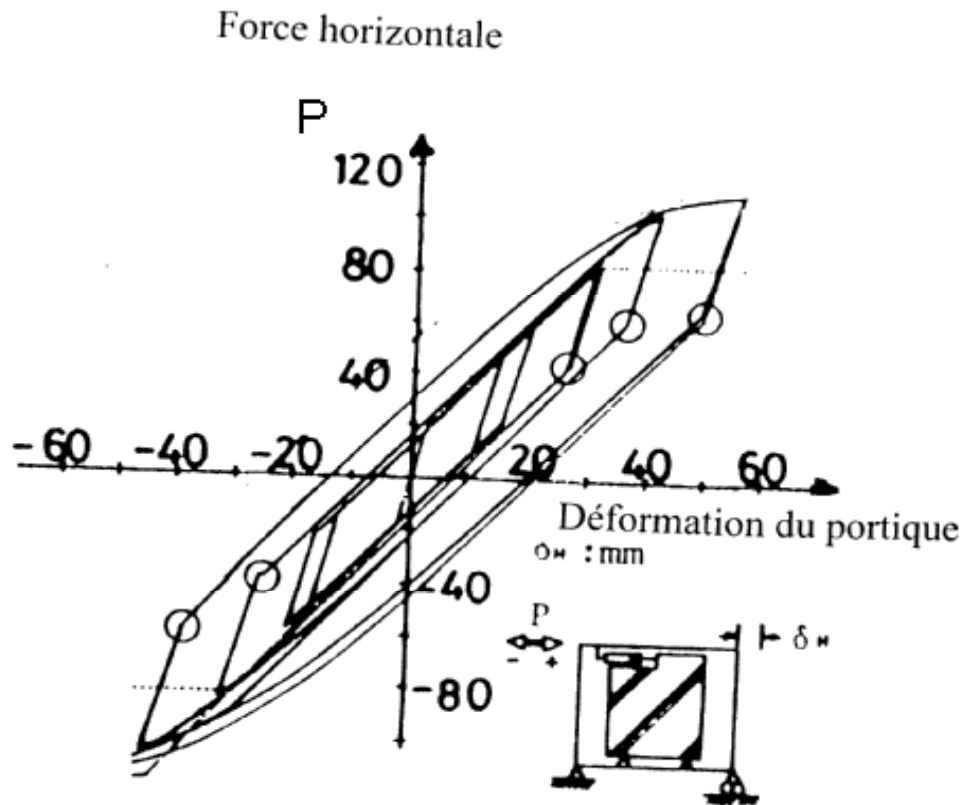


Fig. 5.3 : Courbe caractéristique du système sous charges statiques

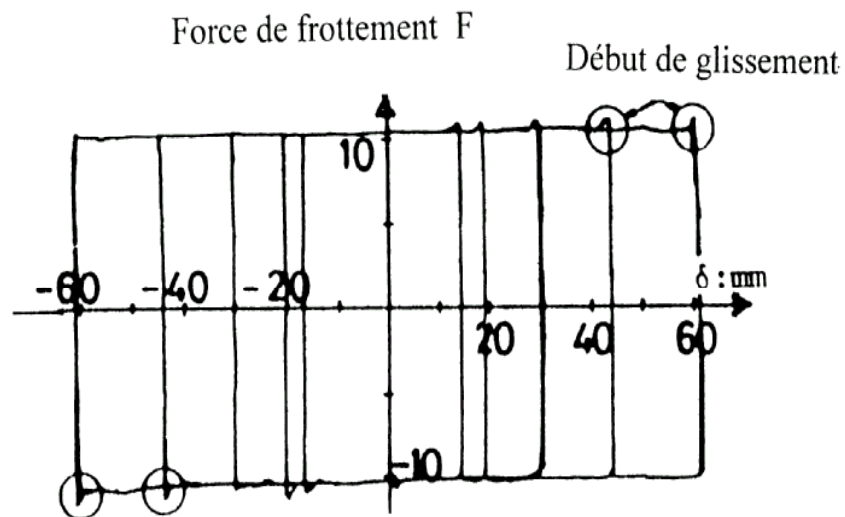


Fig. 5.4 : Courbe caractéristique statique du dissipateur

Cette courbe permet de constater que juste au début du glissement, la force de frottement de glissement est légèrement supérieure à 11 tf, mais une fois le glissement enclenché, elle prend approximativement une valeur de 10 tf et reste stable tout au long du glissement.

42. Résultats des tests sous chargements dynamiques

La courbe caractéristique du comportement du système obtenue à l'issue des phases de chargements dynamiques est représentée sur la figure 55 ci après.

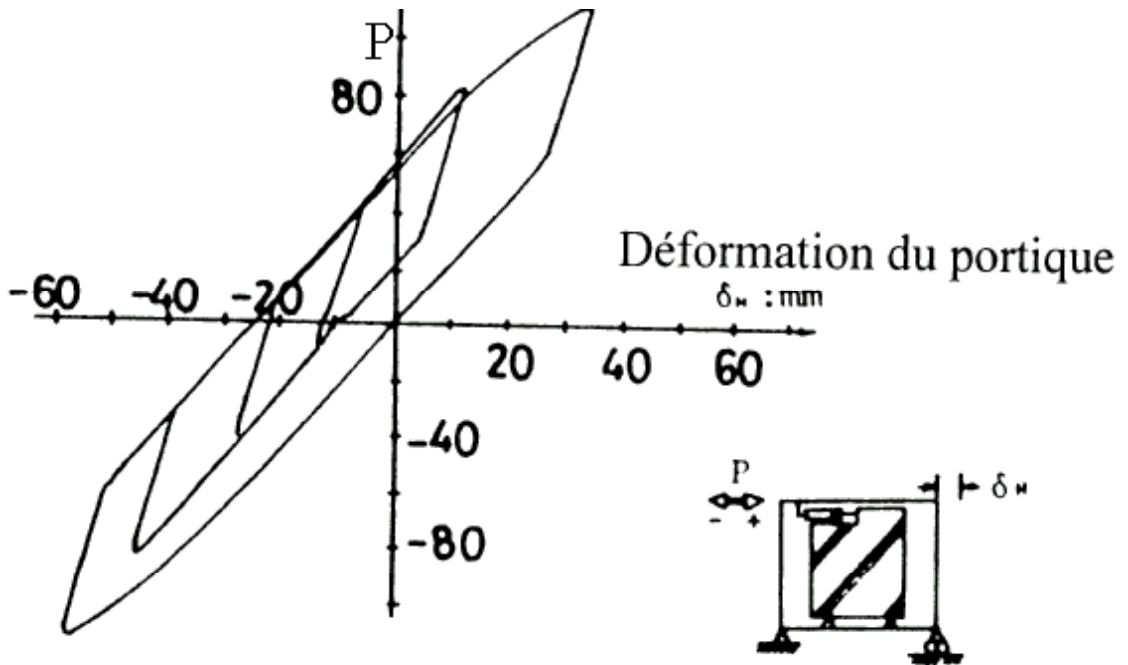


Fig. 5.5 : Courbe caractéristique du système sous charges dynamiques

La courbe caractéristique du système, sous chargements dynamiques, est bilinéaire comme celle obtenue sous chargements statiques et examinée précédemment. Celle du dissipateur seul sous chargements dynamiques est représentée sur la figure 5.6.

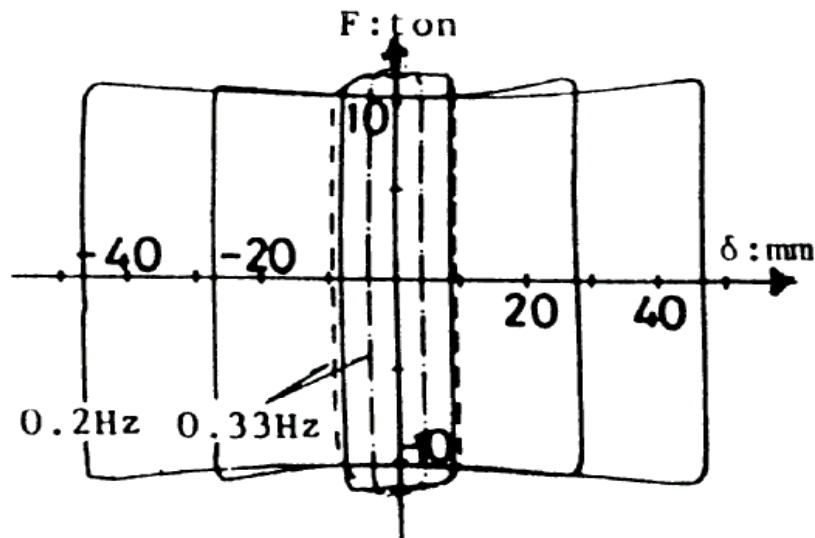


Fig. 5.6 : Courbe caractéristique dynamique du dissipateur

Sur cette courbe, on n'observe plus aucune fluctuation lors du changement de nature de la force de frottement c'est à dire lors de son passage de la phase statique à la phase dynamique. Par contre, la force de frottement de glissement va en diminuant quand la vitesse de la force vibratoire extérieure dépasse 6 cm / s. La courbe change alors de forme et passe d'une forme rectangulaire à une forme concave. L'énergie absorbée et dissipée par le dissipateur diminue au fur et à mesure que la vitesse augmente (voir figure 5.7). La chute de la quantité d'énergie entre celle absorbée à la vitesse de 8.7cm/ s et celle absorbée à la vitesse de 3 cm/s est approximativement de 10%.

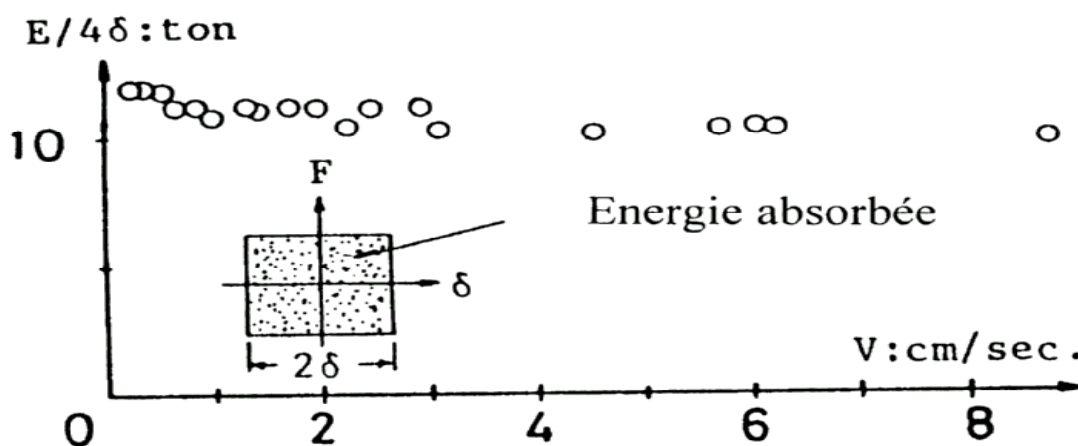


Fig.5.7: Variation de la quantité d'énergie absorbée par le dissipateur

V. DISCUSSIONS DES RESULTATS OBTENUS

La courbe caractéristique obtenue expérimentalement et qui décrit le comportement d'une structure élémentaire, équipée d'un dissipateur d'énergie, soumise à des excitations de nature statique et dynamique est de forme bilinéaire, élasto plastique, sachant que la courbe caractéristique intrinsèque du dissipateur est plutôt de la forme rigide – plastique. Cette modification dans la forme de la courbe est due à la flexibilité des supports du dissipateur sur la structure et probablement à celle des fixations du panneau (support du dissipateur) sur la poutre du plancher bas de la structure. La structure élémentaire testée étant représentative des étages individuels des bâtiments à étages, il s'ensuit que dans toute recherche analytique ultérieure de structures plus complexes munies de dissipateurs, l'utilisation d'une courbe caractéristique de forme bilinéaire du type élasto plastique s'impose pour obtenir des résultats significatifs.

En phase de chargements dynamiques, les boucles d'hystérésis ne sont plus rectangulaires comme celles observées en phase de chargements statiques mais

présentent plutôt une concavité qui est d'autant plus accentuée que la vitesse de chargement est plus élevée.

La quantité d'énergie absorbée par le dissipateur réel mis en place sur la structure est moindre que celle d'un dissipateur idéal de Coulomb. De plus cette quantité d'énergie chute quand la vitesse de chargement augmente.

En transition de phases de chargements de la structure, *i. e.* lors du passage de la phase de chargement statique à la phase de chargement dynamique, le choc dynamique est plus doux qu'il ne l'est dans le cas du test du dissipateur seul. Le choc sonore qui accompagne le choc mécanique est également plus faible dans le cas du dissipateur monté sur structure que dans le cas du dissipateur seul.

CHAPITRE 6

APPLICATION

I. INTRODUCTION

Pour les besoins d'une application pratique de ce type dissipateur par frottement, un bâtiment en cours d'étude (au bureau d'études et d'ingénierie où ce projet a été initié) a été sélectionné sur la base de sa représentativité des bâtiments à étages modernes d'une part et de la simplicité de son système structural d'autre part.

Le principal objectif de cette application est de faire ressortir concrètement l'efficacité de ce dissipateur dans le contrôle du déplacement inter planchers du bâtiment. Il est exigé que la structure principale du bâtiment reste élastique (aucune plastification n'est tolérée), y compris sous l'action d'un séisme majeur. La dissipation de l'énergie sismique est assurée uniquement par le système de dissipateurs d'énergie à frottement.

II. DESCRIPTION DU BATIMENT

21. Configuration générale du bâtiment

Le bâtiment est destiné à un usage administratif. La forme générale adoptée pour le bâtiment est très classique (voir figure 61). Elle résulte de la volonté de l'architecte que le bâtiment produise sur tout observateur une impression de rigueur et de rationalité ce qui est bien exprimé par la forme parallélépipédique. Les dimensions générales en plan de l'ouvrage, le nombre de planchers et la hauteur des étages et du sous sol ont été déduits à partir d'une étude architecturale, incluant les exigences et contraintes du maître de l'ouvrage, telles que la capacité en bureaux, la capacité en places de stationnement de voitures ainsi que la surface du terrain d'assiette. Cette étude a

abouti à un ouvrage composé d'un sous sol servant de parking, d'un rez de chaussée ayant une fonction commerciale et de 8 étages abritant des bureaux. Une gaine technique, abritant les escaliers, l'ascenseur et les toilettes, est placée au centre du bâtiment.



Fig. 61 : Schéma d'ensemble du bâtiment.

Les caractéristiques fonctionnelles et géométriques finales du bâtiment sont les suivantes :

Fonctions	Sous sol :	Parking.
	Rez de chaussée :	Commerces.
	Etages :	Bureaux.
Caractéristiques géométriques :		
	Surface du plancher :	1318 m ²
	Hauteur du sous sol :	5 m
	Hauteur du rez de chaussée :	4.10 m
	Hauteur de l'étage courant :	3.80 m
	Surface en plan du bâtiment :	30 x 42 m ²
	Hauteur du bâtiment :	34 m.

22. Systèmes structuraux

Concernant l'aspect mécanique, le bâtiment est composé d'une infrastructure constituée d'un système de fondations en radier et de la structure du sous sol et d'une superstructure constituée d'un système structural latéral du type ossature spatiale, intégrant un système de dissipation d'énergie dont l'élément central est le dissipateur à frottement et d'un système structural horizontal classique.

22.1. Système structural latéral

Le système latéral est une ossature métallique du type portique tridimensionnel auto-table, constitué de 4 portiques transversaux de 7 travées chacun et de 8 portiques longitudinaux de 3 travées. Un schéma de la coupe en plan de l'un des portiques de la structure, passant par un étage courant est montré sur la figure 6.2

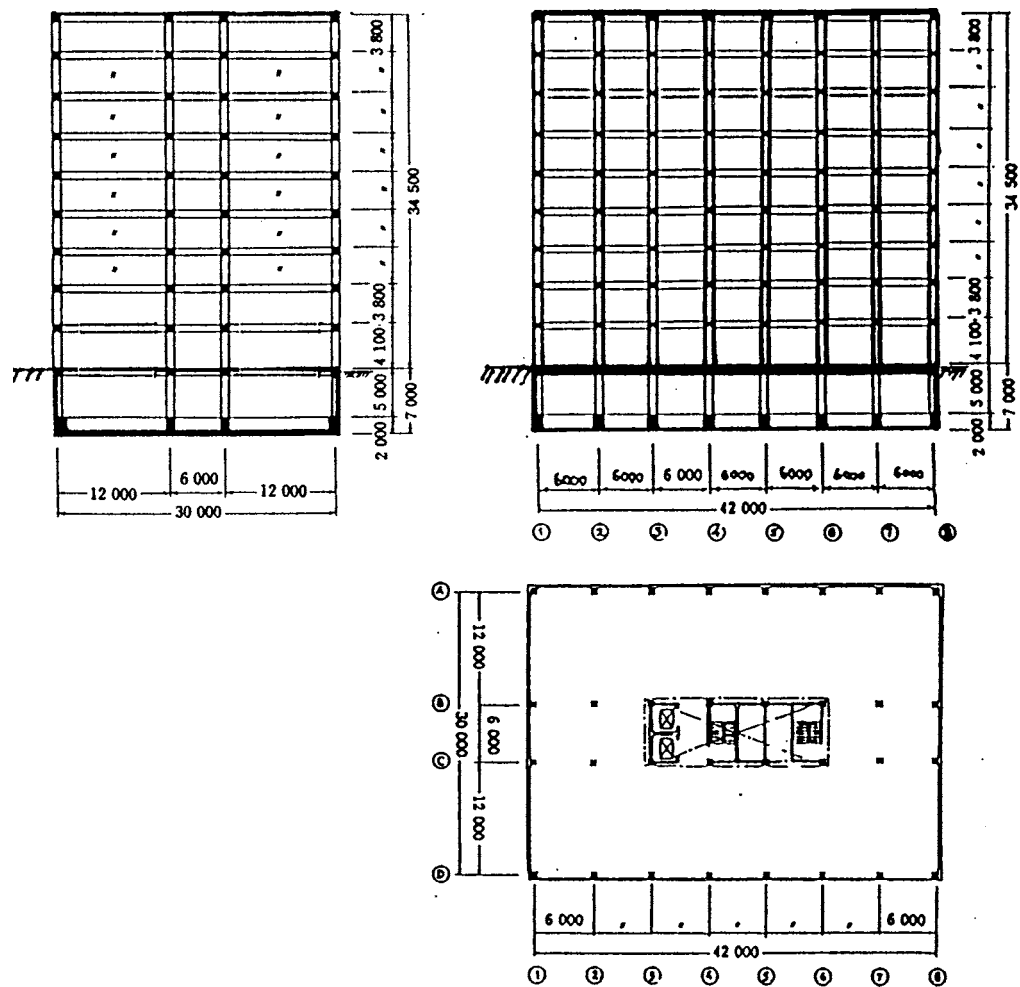


Fig. 6.2 : Schéma de la structure

222. Système de dissipation d'énergie

Le système de dissipation d'énergie se compose d'un ensemble de dissipateurs d'énergie par frottement, de leurs systèmes de fixation et de structures triangulées en acier, servant de support aux dissipateurs, de forme en chevron inversé et placées dans les travées centrales des portiques transversaux et longitudinaux.

Les dissipateurs sont installés de façon que le déplacement inter planchers généré par le mouvement sismique entraîne leur mise en opération. A cet effet, les structures triangulées doivent être très rigides. L'emplacement du système de dissipation est illustré sur la figure 6.3 .

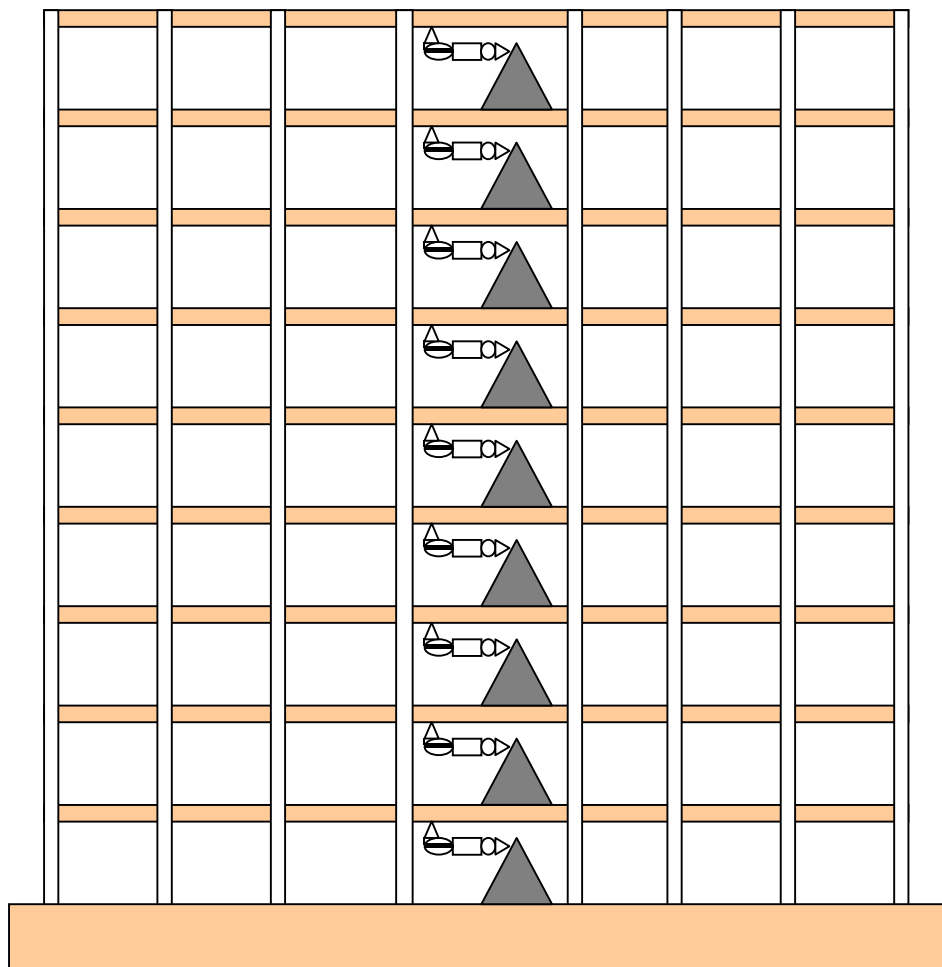


Fig. 8.3. Schéma du système de dissipation d'énergie

223. Système structural horizontal

Le système structural horizontal se compose d'un ensemble de planchers dont chacun est constitué d'une dalle en béton armé et de poutres en acier formant plancher collaborant.

23. Infrastructure

L'infrastructure est constituée d'un caisson en béton armé, de 7 m de haut, porté par un système de fondation en radier. Le sol de fondation a, selon les résultats des études géotechniques effectuées, des caractéristiques moyennes et est classé comme un sol à profil du type 2 selon les normes en vigueur.

III. ANALYSE ET DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE

31. Généralités

Le dimensionnement de la structure est fait sur la base de combinaisons des charges de gravité et de celle correspondant à l'action d'un séisme modéré ainsi que de justifications d'un ensemble de critères de sécurité. La méthode d'analyse utilisée est une méthode statique employant un modèle élastique comme modèle décrivant la courbe caractéristique de la structure.

Néanmoins, le comportement de la structure est prévu de rester élastique y compris sous l'action d'un séisme majeur. A cet effet, la quantité d'énergie correspondant à l'excédant de forces entre les 2 niveaux de séismes est prévue d'être absorbée et dissipée uniquement par le dispositif de dissipation qui est adjoint à la structure. Par conséquent, aucune exigence en ductilité n'est imposée à la structure et ainsi les dispositions constructives et autres mesures associées habituellement à cette fonction structurale deviennent inutiles dans le cas présent.

32. Paramètres de calcul

a) Charges de gravité.

Les valeurs des charges permanentes CP_i et des charges d'exploitation S_i appliquées sur chaque plancher i qui ont été retenues pour le dimensionnement des composants des systèmes structuraux sont indiquées ci après.

Plancher haut (terrasse, $i = 9$)

$$CP_9 = 615 \text{ daN/mm}^2.$$

$$S_9 = 130 \text{ daN/mm}^2 \text{ (combinaison de charges sans charge sismique).}$$

$$60 \text{ daN/mm}^2 \text{ (combinaison de charges avec charge sismique).}$$

Planchers courants (bureaux, $i = 1, 8$)

$$CP_i = 355 \text{ daN/mm}^2.$$

$$S_i = 180 \text{ daN/mm}^2 \text{ (combinaison de charges sans charge sismique).}$$

$$80 \text{ daN/mm}^2 \text{ (combinaison de charges avec charge sismique).}$$

b) Charges sismiques.

Les valeurs des forces sismiques F_i qui s'exercent sur chaque plancher i et qui définissent l'action d'un séisme modéré ainsi que celles des efforts tranchants Q_k des étages k correspondants ont été déterminées comme suit :

$$F_{i(k)} = Q_k - Q_{k+1}$$

$$\text{Où } Q_k = C_k \cdot \Sigma W_i$$

ΣW_i : Poids de la partie du bâtiment au dessus du plancher i correspondant au plancher k considéré.

C_k : Coefficient sismique de l'étage k considéré.

$$C_k = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_o$$

Z : Coefficient d'aléa sismique de la zone d'implantation.

R_t : Facteur dynamique du système sol structure.

A_i : Facteur de distribution latéral de l'effort tranchant.

C_o : Coefficient sismique de référence. $C_o = 0.2$ (séisme modéré).

Les valeurs finales obtenues sont consignées dans le tableau 6.1.

N° de plancher i	Poids W_i (t)	ΣW_i (t)	C_k	Q_k (t)	$F_{i(k)}$ (t)
9	1042	1042	0.389	405	405
8	667	1709	0.329	562	158
7	667	2376	0.293	696	134
6	667	3043	0.268	815	119
5	667	3710	0.247	916	101
4	667	4377	0.227	993	77
3	667	5044	0.211	1064	71
2	667	5711	0.194	1108	44
1	675	6386	0.180	1149	41

Tableau 6.1: valeurs des forces sismiques de calcul de la structure.

33. Analyse de la structure

L'analyse de la structure a été effectuée en utilisant le programme de calcul « Building », développé par Nikken Sekkei Ltd et approuvé par le ministère de la construction japonais.

34. Dimensionnement de la structure

Après analyses et vérifications des différents critères de sécurité en conformité avec les règles en vigueur, les éléments de la structure (voir figure 6.4) ont été entièrement

définis. La forme des profilés de la structure et leurs caractéristiques géométriques sont rapportées dans le tableau 6.2.

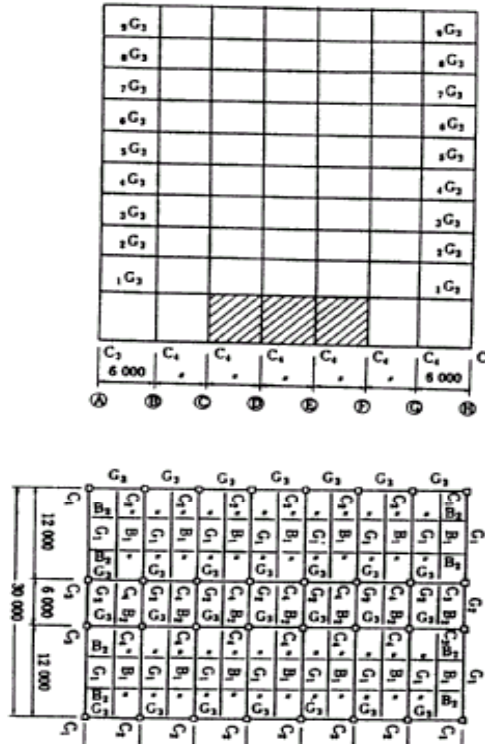


Fig.6.4 : Structure et éléments.

Elément /étage	Files	Section de l'élément	Ixx (x 1000 cm ⁴)	Iyy (x 1000 cm ⁴)	Longueur (cm)
C / 7 à 9	1 , 4	□ 432 x 432 x 16	76.9	—	380
C / 4 à 6	1 , 4	□ 438 x 438 x 19	93.3	—	380
C / 2 à 3	1 , 4	□ 444 x 444 x 22	110	—	380
C / 1	1 , 4	□ 456 x 456 x 28	147	—	410
C / 7 à 9	2 , 3	□ 432 x 432 x 16	76.9	—	380
C / 4 à 6	2 , 3	□ 438 x 438 x 19	93.3	—	380
C / 2 à 3	2 , 3	□ 450 x 450 x 25	128	—	380
C / 1	2 , 3	□ 456 x 456 x 28	147	—	410
P / 9	1	HB-500 x 250 x 12 x 19	64.8	130	1200
P / 7 à 8	1	HB-550 x 250 x 12 x 19	80.4	160	1200
P / 5 à 6	1	HB-600 x 250 x 12 x 22	109	218	1200
P / 2 à 4	1	HB-600 x 250 x 12 x 25	120	240	1200
P / 9	2	HB-500 x 250 x 12 x 19	64.8	130	600
P / 7 à 8	2	HB-550 x 250 x 12 x 19	80.4	160	600
P / 5 à 6	2	HB-600 x 250 x 12 x 22	109	218	600
P / 2 à 4	2	HB-600 x 250 x 12 x 25	120	240	600
P / 7 à 9	3	HB-500 x 250 x 12 x 19	64.8	97.2	600
P / 5 à 6	3	HB-550 x 250 x 12 x 19	104	156	600
P / 2 à 4	3	HB-600 x 250 x 12 x 22	109	164	600

C : Poteau P : Poutre

Tableau 6.2 : Caractéristiques des profilés de la structure.

IV. ELEMENTS DE DIMENSIONNEMENT DU DISSIPATEUR

41. Généralités

Pour une application donnée, le dimensionnement du dissipateur à frottement nécessite de connaître préalablement les valeurs utiles de la course et de la force de glissement de ce dissipateur. La course utile permet d'estimer la longueur du corps creux cylindrique du dissipateur. La force utile de glissement permet notamment d'évaluer la force radiale et, par conséquent, le couple de serrage à appliquer sur l'écrou de réglage et de déterminer l'épaisseur du corps cylindrique. Or, de la force de glissement dépend la quantité d'énergie que peut dissiper le dispositif par cycle. En effet, cette quantité est égale au produit de la force de glissement par la course ou distance de glissement. Il apparaît que si la force de glissement est trop élevée, il n'y aura pas de glissement du dissipateur et la quantité d'énergie dissipée sera alors nulle. Par contre, si cette force est trop faible, la course étant limitée pour des raisons technologiques et structurales, la quantité d'énergie dissipée sera négligeable. Entre ces 2 situations extrêmes, il existe une valeur de la force de glissement qui permet d'aboutir à optimiser la quantité d'énergie dissipée et à satisfaire aux exigences de fonctionnement. Cette force est dite force optimale de glissement.

Pour la présente application, la détermination préalable de la valeur de la force optimale de glissement du dissipateur est donc nécessaire aussi bien pour le dimensionnement du dissipateur que pour son efficacité à réduire la réponse structurale.

A cet effet, une étude paramétrique portant sur le dissipateur en contexte d'exploitation et ayant pour objet le dimensionnement optimal du dispositif a été menée.

42. Etude paramétrique

421. Introduction

Dans cette étude, le paramètre ayant été considéré comme pouvant influencer le fonctionnement et l'efficacité du système, c'est à dire le taux de réduction de la réponse du système structural intégrant le dissipateur d'énergie, est la force de frottement de glissement F du dissipateur.

L'intervalle et le nombre de valeurs de ce paramètre a été raisonnablement sélectionné. Pour chaque variation du paramètre, une analyse dynamique non linéaire dans le domaine temporel est effectuée. Les modèles physique et mathématique régissant le mouvement du système sont décrits ci-après.

422. Modélisation du système

Le système structural intégrant les dissipateurs a été modélisé par un système plan à 9 degrés de liberté de translation latérale. Les éléments qui composent le modèle et leur assemblage sont illustrés sur la figure 6.5. Les masses M_i , les ressorts de raideur K_{si} et les amortisseurs visqueux représentent les caractéristiques du système structural latéral. Les ressorts de raideurs K_{di} et l'élément de frottement à sec représentent le système de dissipation d'énergie (dissipateurs et leur support). La courbe caractéristique du système de dissipation, composé par le ressort K_d et l'élément de frottement à sec est montrée sur la figure 6.6.

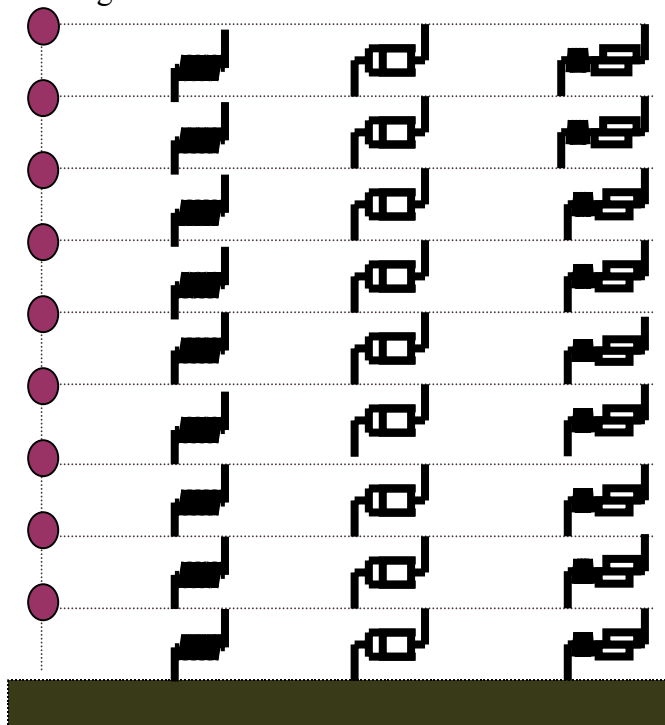


Fig. 6.5 : Modèle analytique.

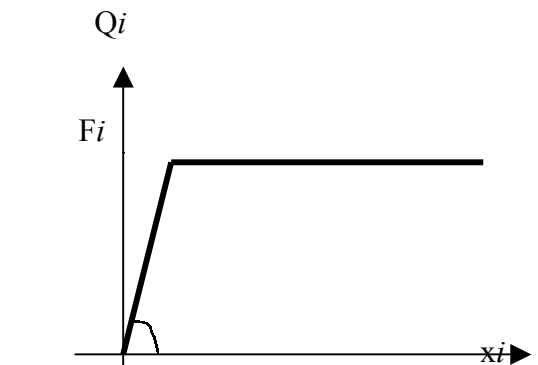


Fig. 6.6 : Courbe caractéristique du système de dissipation.

423. Equation du mouvement

L'équation différentielle qui régit le mouvement de ce système est donnée par la formule symbolique 6.1.

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C_s] \{\dot{x}\} + [K_s] \{x\} + Q(F, x) = -[M] \{1\} \ddot{u}_g \quad (6.1)$$

où $[M]$: Matrice des masses.

$[C_s]$: Matrice d'amortissement.

$[K_s]$: Matrice de rigidité de la structure.

$Q(F, x)$: Caractéristique du système de dissipation (voir figure 6.6).

\ddot{u}_g : Accélération du sol.

L'amortissement du système est supposé être du type de Rayleigh. Dans ce cas particulier, il est donné par la relation (6.2) ci après.

$$[C_s] = \frac{2 \cdot h_1}{w_1} \cdot [K_s] \quad (6.2)$$

Où h est le taux d'amortissement critique. En pratique, pour les structures métalliques courantes, il est égal à 2 %.

424. Analyse du système

Une série d'analyses dynamiques non linéaires dans le domaine temporel a été effectuée pour résoudre l'équation 6.1. Dans cette série d'analyses, le paramètre variable est la force de frottement de glissement F . La valeur de F au niveau de chaque plancher i a été considérée comme étant une proportion du poids de ce plancher. Elle est obtenue par la relation 6.3.

$$F_i = \mu W_i \quad (6.3)$$

L'éventail des valeurs ayant été considérées pour ce paramètre est reporté sur le tableau 6.3.

N°	1	2	3	4	5	6	7	8
μ	0.0	0.03	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50

Tableau 6.3 : Valeurs du paramètre F_i

La valeur de $\mu = 0.0$ est utilisée pour déterminer la réponse du système structural seul (sans système de dissipation). Les résultats obtenus pour cette valeur servent comme référence pour évaluer l'efficacité du système global.

Le chargement utilisé dans ces analyses est celui correspondant à un séisme majeur. Un mouvement sismique, dont l'accélération est donnée par la composante Nord / Sud de l'enregistrement d'El Centro du séisme d'Impérial Valley du 8 mai 1940, est appliqué au niveau des appuis du modèle. L'accélération maximale est prise égale à 0.3.g (g étant l'accélération de la pesanteur).

425. Résultats obtenus

Les principaux résultats obtenus à l'issue de cette série d'analyses peuvent être résumés comme suit :

1. Comme le montre les figures 6.7 à 6.8, pour $\mu > 0.3$, la valeur de μ a une faible influence sur la réponse du système global. La force optimale de glissement du dissipateur intégré dans la structure du bâtiment étudié est donc proche de celle donnée par la valeur de $\mu = 0.2$

2. Pour les valeurs de μ tel que $0.03 \leq \mu \leq 0.20$, l'influence de la valeur de la force de glissement sur la réponse du système est importante comme le montre les figures 6.7 b et 6.8 b.

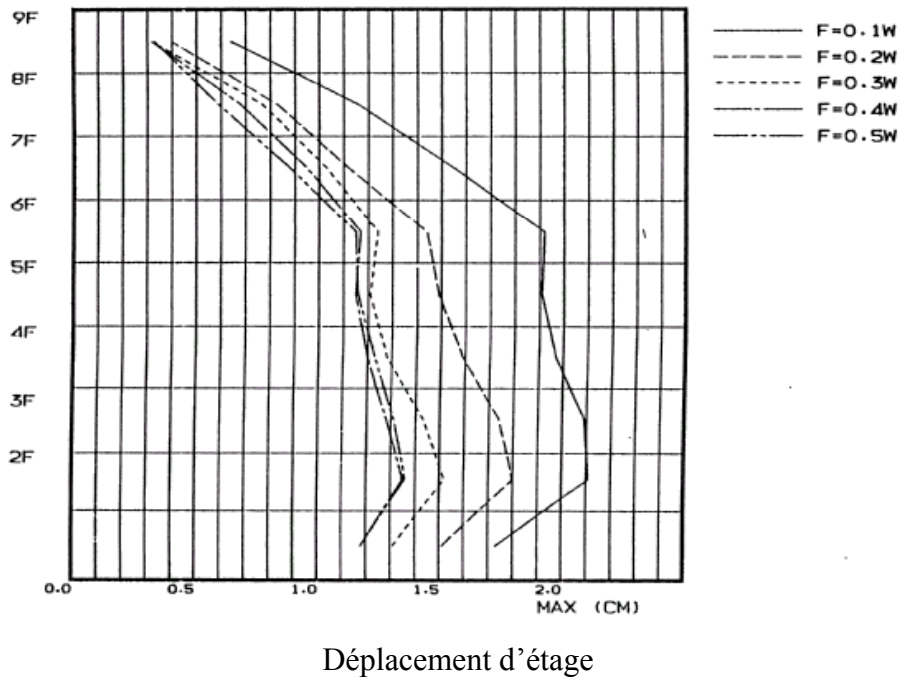


Fig. 67 a : Influence de la force de glissement sur le déplacement max. de plancher.

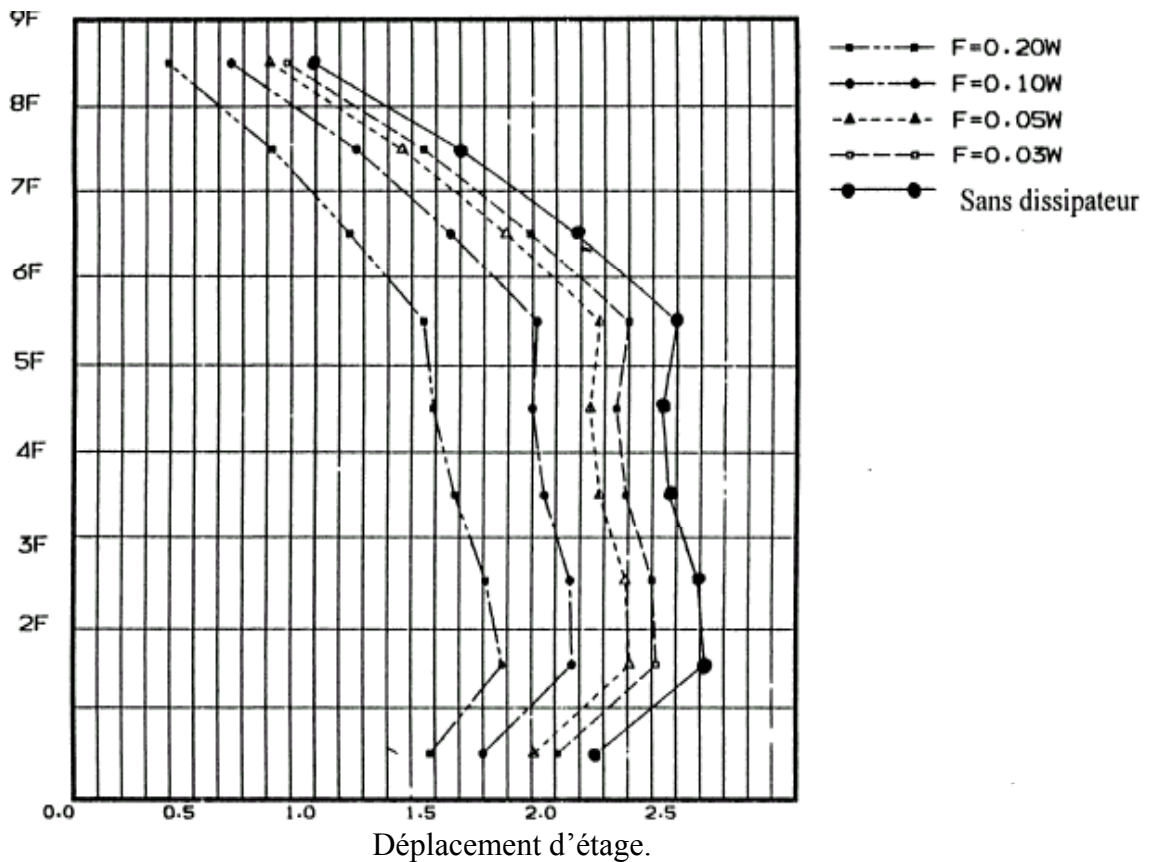


Fig.6.7 b : Influence de la force de glissement sur le déplacement max. de plancher.

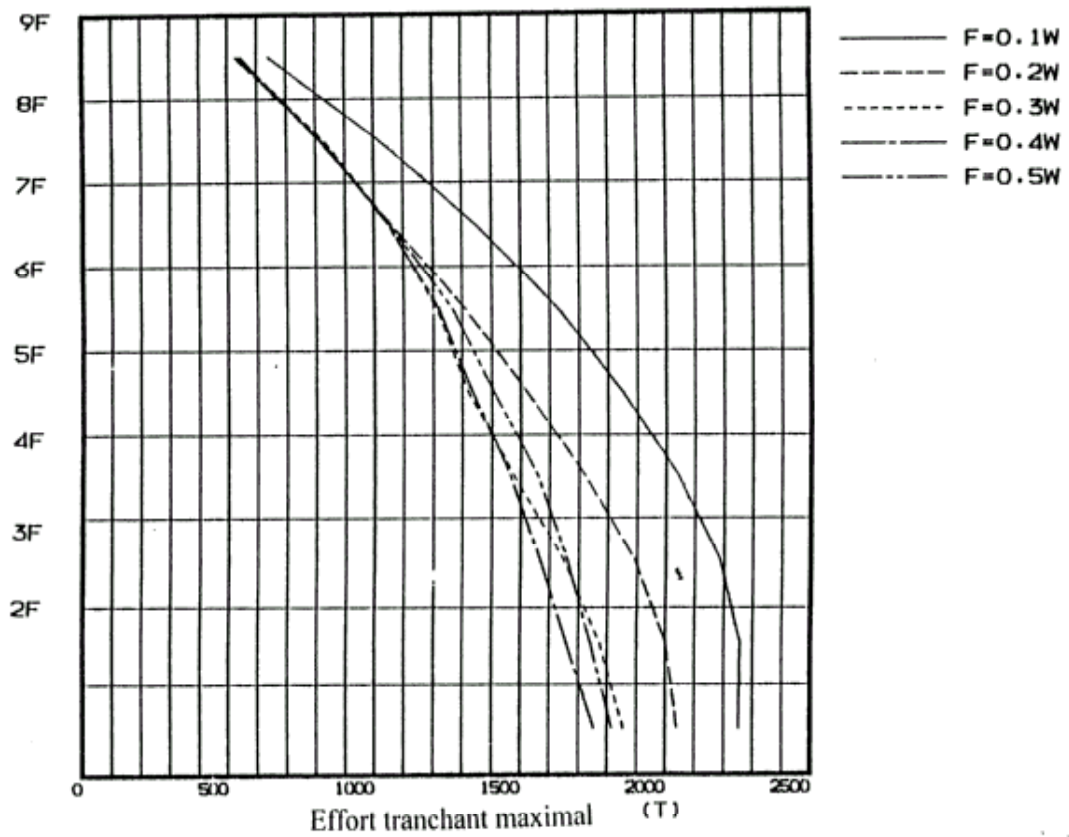


Fig. 6.8 a : Influence de la force de glissement sur l'effort tranchant max. d'étage.

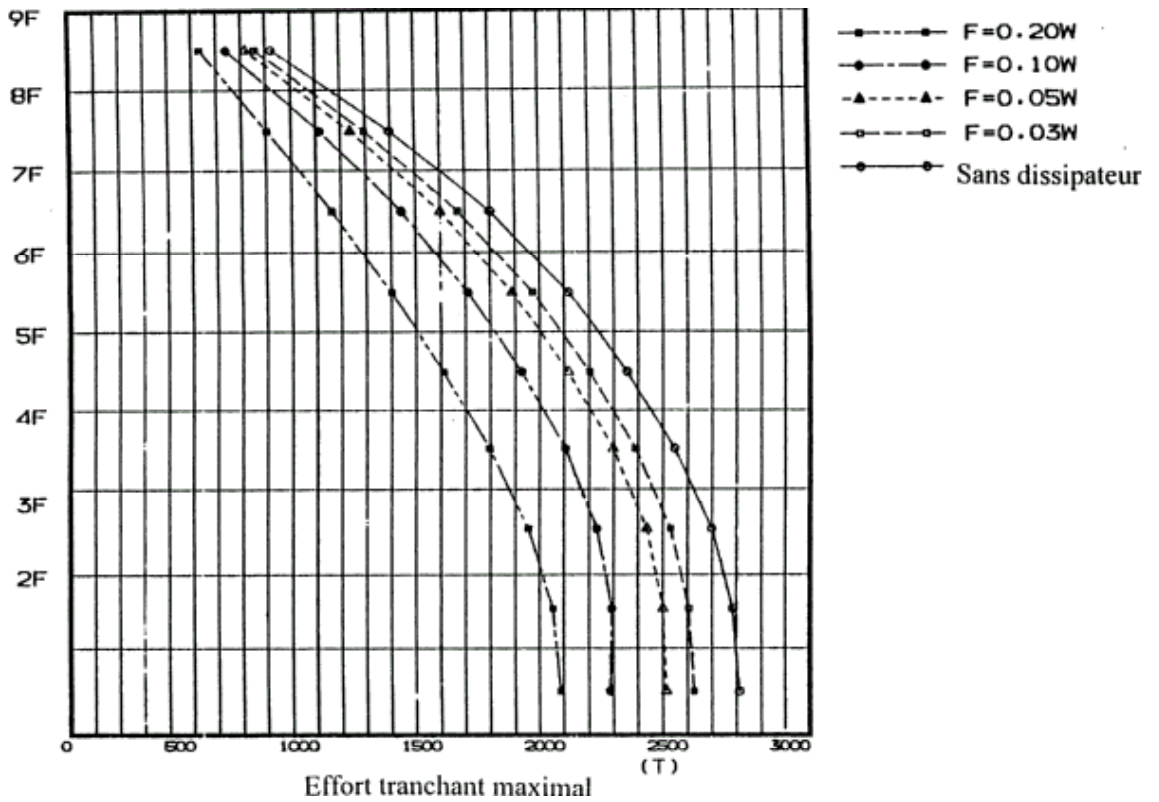


Fig.6.8 b : Influence de la force de glissement sur l'effort tranchant max. d'étage.

43. Conclusion

Au vu des résultats obtenus à l'issue de l'étude paramétrique, la force de glissement optimale du dissipateur prévu d'équiper le bâtiment a une valeur voisine de 0.2 W soit 20 % du poids du plancher. Néanmoins, en pratique, le dimensionnement du dissipateur fait intervenir plusieurs aspects tels que les aspects mécaniques (résistance des composants : tige, corps), les aspects liés à la fabrication et à l'installation du dissipateur et l'aspect économique. Dans cette étude, seule l'influence de la force de glissement du dissipateur a été examinée compte tenu de son influence directe sur l'efficacité du système. En conséquence, il a été jugé que le dissipateur optimal prévu pour cette application aura une force de frottement égale à 10 % du poids du plancher.

V. EFFICACITE DU SYSTEME DE DISSIPATION

51. Généralités

Le dimensionnement de la structure et celui du dissipateur étant menés à terme, le système est donc entièrement défini. La dernière étape de cette application, dont le contenu est synthétisé dans le présent paragraphe, consiste à évaluer l'efficacité du dissipateur à frottement utilisé. A cet effet, une étude analytique a été effectuée.

52. Etude analytique

Un modèle de poutre cisailée, à 9 degrés de liberté en translation a été utilisé pour représenter la structure du bâtiment (voir figure 6.5).

Le dissipateur est modélisé par un élément de frottement de coulomb et son support par une triangulation en chevron supposée très rigide. La force F de glissement du dissipateur à l'étage i est égale à $0.1.W_i$. L'amortissement structural est supposé être du type de Rayleigh comme expliqué précédemment.

521. Analyse dynamique

Des analyses dynamiques non linéaires dans le domaine temporel ont été effectuées pour obtenir la réponse du système. Comme chargement, 3 accélérogrammes de séismes réels, dont les intitulés et les enregistrements sont représentés sur la figure 6.9, ont été considérés dans cette étude.

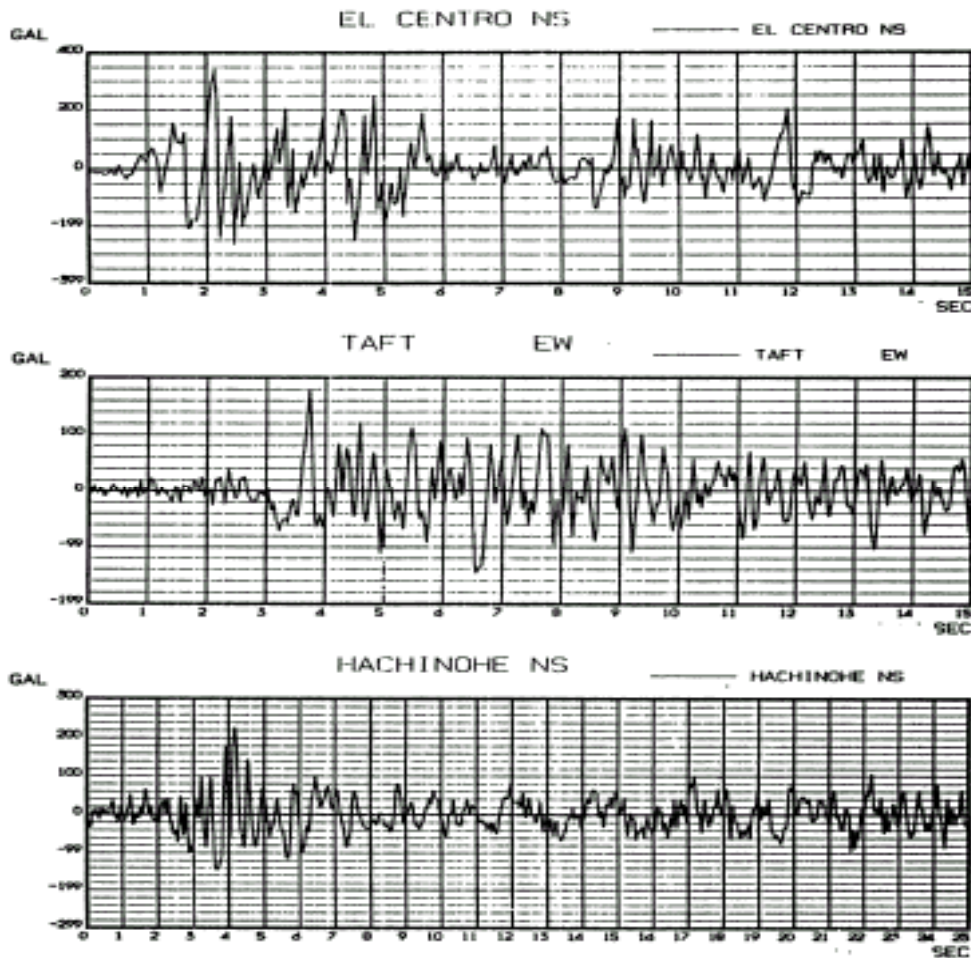


Fig. 6.9 : Enregistrements de accélérogrammes utilisés

Pour examiner l'influence de l'intensité des séismes, 3 niveaux d'accélération ont été considérés lors des analyses (0.10 g, 0.20g, 0.30g). Une analyse de la réponse du système sans dissipateur a été effectuée pour obtenir les données devant servir de référence aux comparaisons et permettant ainsi d'évaluer la performance du dissipateur employé.

522. Programme d'analyse

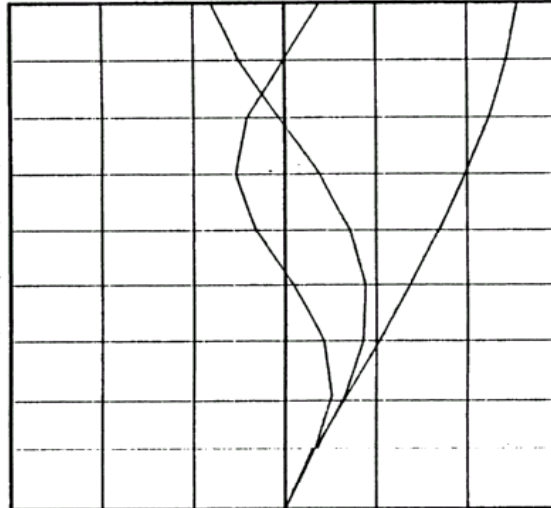
Pour cette série d'analyses dynamiques non linéaires, le programme d'analyse Dynamics Phase 71, développé par le bureau d'études et d'ingénierie japonais Nikken Sekkei a été utilisé. Ce programme utilise la méthode numérique d'intégration pas à pas avec variation linéaire de l'accélération au cours de l'incrément de temps, dite méthode de Newmark. Les calculs ont été exécutés sur une machine IBM du centre de calcul de Nikken Sekkei.

53. Résultats obtenus

Les principaux résultats auxquels a abouti l'étude analytique, présentés sous forme synthétique, sont donnés ci après.

1. Caractéristiques dynamiques du bâtiment

Les périodes naturelles et les formes modales des 3 premiers modes de vibrations du bâtiment sont représentées sur la figure 6.10.



Périodes:

$$T_1 = 0.74 \text{ s}$$

$$T_2 = 0.25 \text{ s}$$

$$T_3 = 0.15 \text{ s}$$

Fig. 6.10 : Périodes et formes modales du bâtiment

Les périodes naturelles du bâtiment équipé du système de dissipation (dissipateurs et leur support) sont plus courtes que celles du bâtiment dont la structure n'en est pas équipé. Pour cette dernière, les périodes sont : $T_1 = 1.05 \text{ s}$, $T_2 = 0.35 \text{ s}$ et $T_3 = 0.20 \text{ s}$. Cette constatation s'explique par la présence du support du dissipateur dont la rigidité étant en parallèle à celle de la structure a pour effet de rigidifier davantage le système global et par conséquent d'écourter les périodes du système.

2. Taux de réductions de la réponse du système.

Le profil de la distribution de la réponse sur la hauteur du bâtiment dans le cas où il est équipé de dissipateurs et celui dans le cas où il ne l'est pas sont similaires. Cette constatation est vraie quelque soit le terme de la réponse considéré. Seules les

valeurs des différents termes de la réponse varient dans le sens des moindres valeurs dans le cas où le bâtiment est équipé de dissipateur. Les réductions de la réponse en termes de déplacement relatif maximal de plancher et d'effort tranchant maximal d'étage, correspondant aux niveaux d'accélération maximale au sol de 0.1g et 0.3g de chacun des 3 séismes considérés sont présentées sur les figures 6.11 a, 6.11 b et 6.11 c et sur les figures 6.12 a, 6.12 b et 6.12 c.

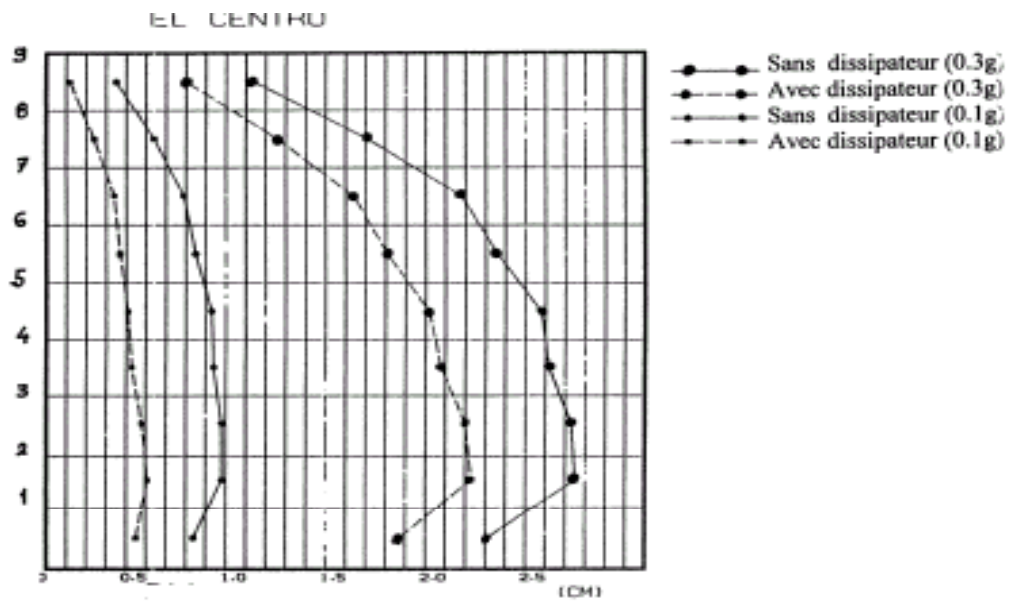


Fig. 6.11 a : Déplacements relatifs max. de plancher (El Centro).

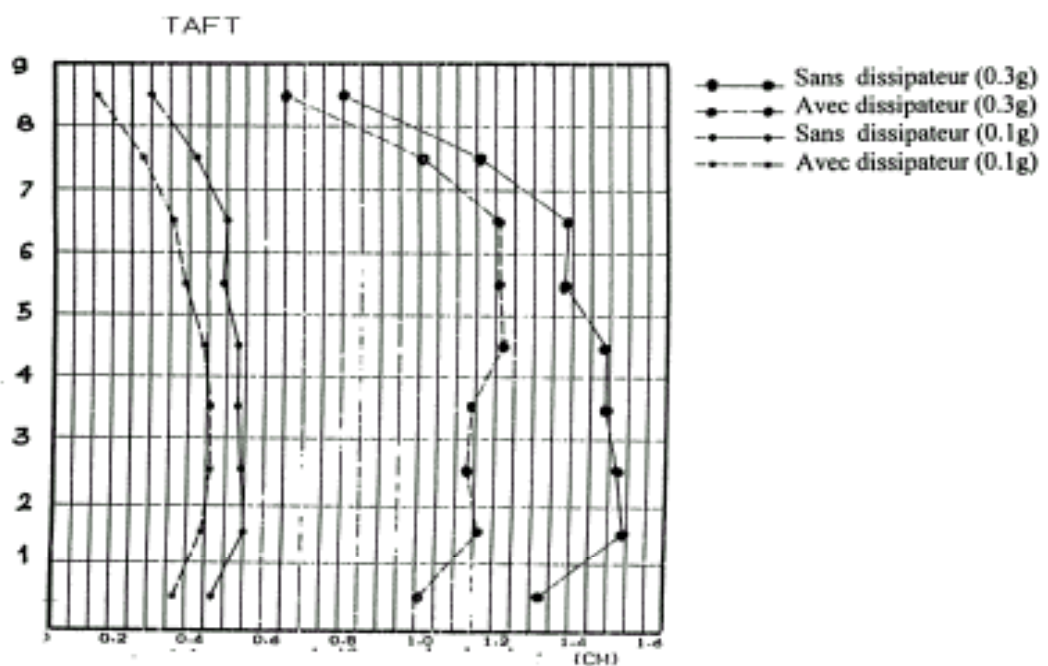


Fig. 6.11 b : Déplacements relatifs max. de plancher (Taft).

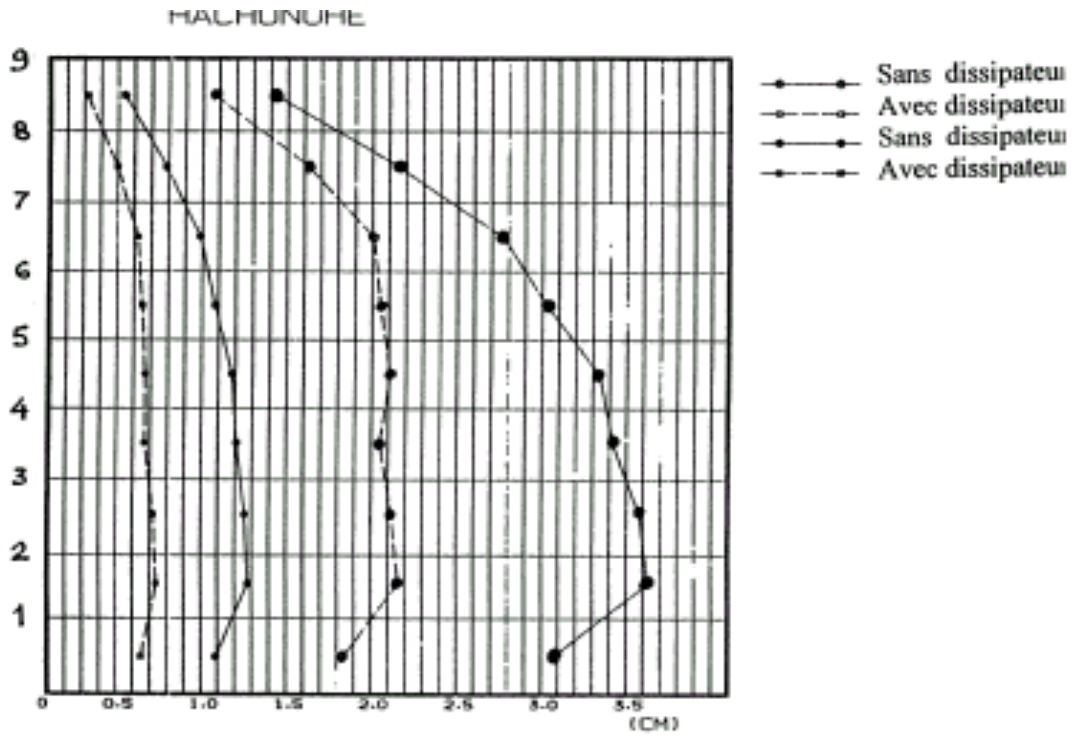


Fig. 6.11 c : Déplacements relatifs max. de plancher (Hachinohe).

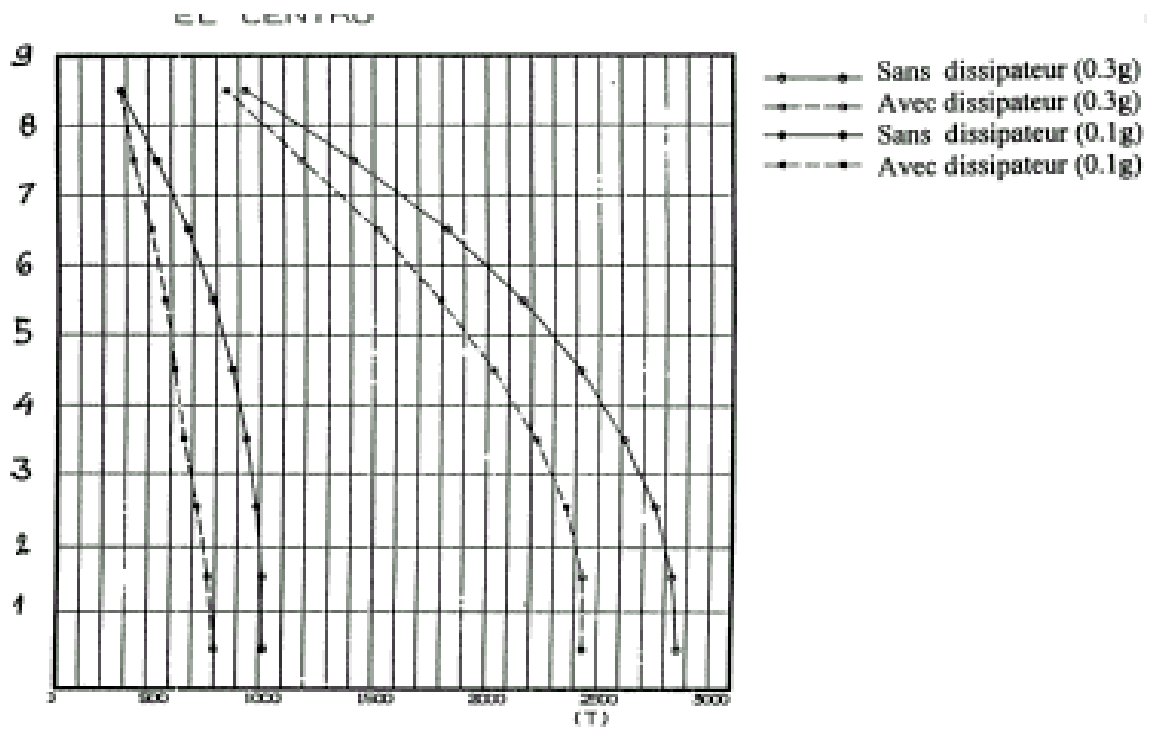


Fig. 6.12 a : Efforts tranchants max. (El Centro).

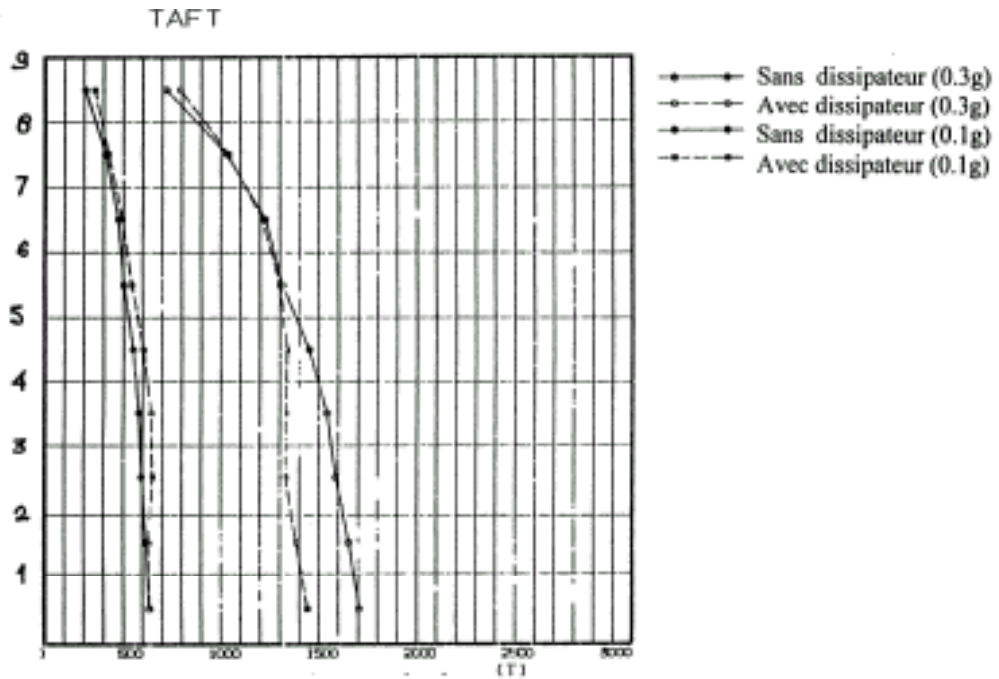


Fig. 6.12 b : Efforts tranchants max. (Taft).

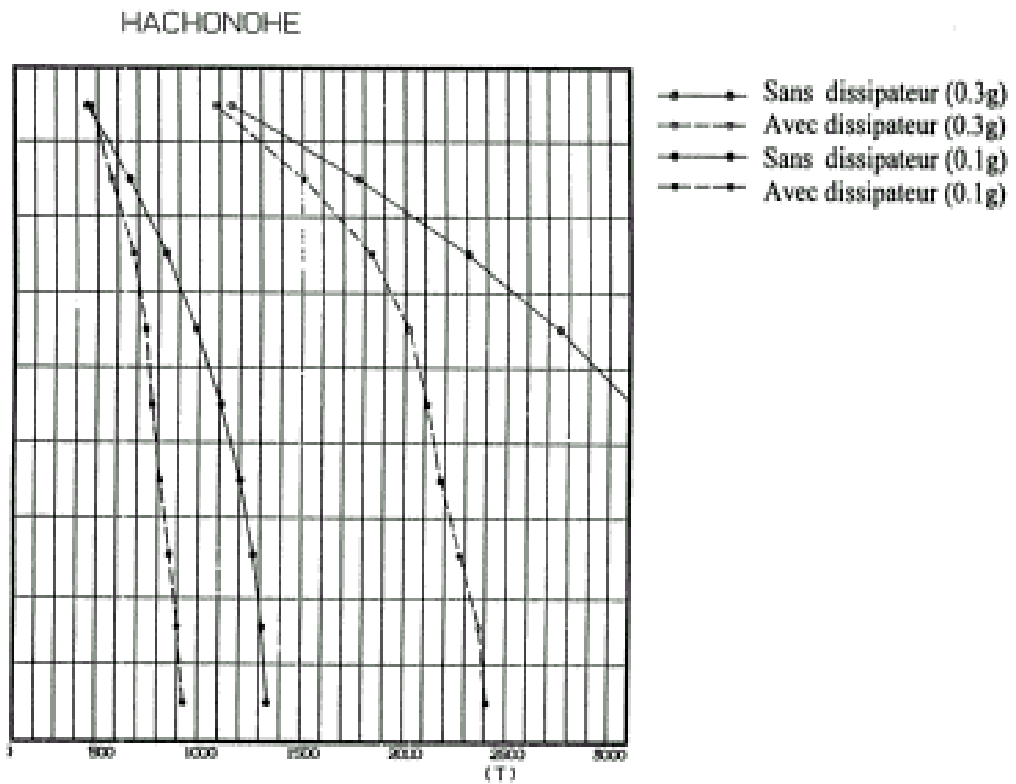


Fig. 6.12 c : Effort tranchant max. (Hachinohe).

3. Evaluation des taux de réductions.

Le taux de réduction du déplacement de chaque plancher i peut être évalué comme suit :

$$\frac{\delta_i(\text{Bât. sans dis.}) - \delta_i(\text{Bât. avec dis.})}{\delta_i(\text{Bât. sans dis.})} \cdot 100 \quad (6.4)$$

Les valeurs du taux de réduction du déplacement du 9^{ème} plancher, correspondant aux niveaux d'accélération maximale au sol de 0.1g et 0.3g de chacun des 3 séismes considérés sont présentées dans le tableau 6.4. Les déplacements sont en cm.

	0.1 g		Taux	0.3 g		Taux
	δ_9 (sans dis.)	δ_9 (avec dis.)		δ_9 (sans dis.)	δ_9 (avec dis.)	
El Centro	6.35	3.19	49.8	19.06	13.50	29.2
Taft	3.66	2.54	30.6	11.0	7.54	31.4
Hachinohe	8.50	4.32	48	25.5	15.48	39.3

Tableau 6.4: Valeurs du taux de réduction du déplacement du 9^{ème} plancher.

Au niveau du dernier plancher, un taux de réduction du déplacement variant entre 29.2 % et 49.8 % a été obtenu pour les types de séismes et l'intervalle de chargement sismique retenus et qui peuvent être considérés comme couvrant l'essentiel des situations pouvant survenir en pratique. A niveau des planchers inférieurs, le taux de réduction est encore plus élevé comme il en ressort des figures précédentes. Le taux de réduction obtenu en équipant ce bâtiment par des dissipateurs est jugé comme satisfaisant.

**CHAPITRE
7**

**CONCLUSIONS
ET
RECOMMANDATIONS**

I. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Un dispositif original de dissipation d'énergie par frottement appartenant aux systèmes de contrôle structural passif, proposé par Sumitomo et développé par les chercheurs de Nikken Sekkei, a été étudié en tant que moyen de réduction de la réponse des structures de bâtiments soumis à des excitations sismiques. Le dispositif composé notamment d'un dissipateur mécanique utilisant le frottement à sec comme mécanisme hystérétique de dissipation d'énergie est à insérer entre 2 planchers consécutifs de la structure des bâtiments pour réduire le déplacement inter planchers.

Cette étude, constituant une partie complémentaire d'une étude initiale menée dans le cadre d'un grand projet de recherche japonais, comporte entre autres les détails et les résultats de tests portant sur ce type de dissipateur monté sur banc d'essai et ceux d'une investigation expérimentale portant sur une structure élémentaire, représentative des structures de bâtiments à étages et intégrant un dissipateur du genre en question. Les résultats expérimentaux acquis auprès du laboratoire ayant effectué les essais et expériences ont permis de caractériser les comportements dynamiques du dissipateur séparé et en contexte. Ils ont permis notamment de constater que la courbe caractéristique du comportement dynamique réel du dissipateur isolé peut être modélisée avec une précision suffisante par une courbe rigide plastique appelée modèle analytique de Coulomb. L'influence de certains aspects sur la courbe caractéristique tels que la température de la surface de frottement et le nombre de cycles de chargement a été examinée dans le cadre du programme expérimental. Les résultats obtenus montrent que

la courbe caractéristique du dissipateur est stable. Dans le cas de la structure élémentaire, la courbe caractéristique expérimentale prend une allure différente à cause de l'influence de la flexibilité du support du dissipateur. Au vu des résultats, il a été jugé que le modèle analytique le plus approprié pour le dissipateur en contexte est le modèle élasto plastique.

L'étude comporte aussi une application portant sur un bâtiment représentatif d'une catégorie de bâtiments, courante ailleurs et appelée certainement à se développer en Algérie dans le futur, à savoir les bâtiments de moyenne hauteur. La mise en œuvre de cette application a nécessité de procéder à une étude paramétrique ayant pour objectif de déterminer la valeur de la force de glissement qui optimise la quantité d'énergie dissipée par le dispositif devant effectivement équiper le bâtiment. Des résultats obtenus à l'issue de la mise en œuvre de l'application, il ressort que le dispositif, non seulement évite à la structure principale du bâtiment toute plastification et donc tout dommage ce qui constitue un avantage appréciable, mais permet en plus d'obtenir des taux de réduction de la réponse structurale très significatifs et cela pour divers types et niveaux d'excitations sismiques.

Au vu de l'ensemble des résultats obtenus au cours de cette étude, il peut être conclu que le dispositif étudié, dispose d'un grand potentiel pour devenir un moyen efficace quand des réductions élevées de la réponse des structures de bâtiments sont exigées. Des solutions à un grand nombre de problèmes rencontrés très souvent en pratique dans le domaine du bâtiment sont suggérées par cette étude. A titre d'illustration, on peut citer le problème de renforcement des bâtiments existants, la protection parasismique des bâtiments classés stratégiques pour lesquels l'utilisation de ce dispositif constitue une solution idoine. Certes, d'un point de vue pratique, l'utilisation du dispositif pose dans l'immédiat quelques difficultés liées à sa fabrication soignée et à son coût relativement élevé comparativement à celui d'autres dispositifs similaires. Cependant pour certaines applications particulières tels que les bâtiments stratégiques devant rester opérationnels pendant et après séismes et au regard des niveaux de performance qu'il permet d'atteindre, les avantages associés à l'emploi de ce dissipateur compensent largement les inconvénients liés à ces difficultés et au coût.

Cette étude doit être considérée comme une étude préliminaire. Malgré le fait que les premières investigations expérimentales et analytiques ont montré que le dispositif est fiable et efficace, des travaux de recherche complémentaires sont nécessaires pour arriver à une meilleure maîtrise de cette technique avant son passage vers le domaine des

applications pratiques réelles. Parmi les thèmes pouvant faire l'objet de futures recherches concernant ce dispositif, on peut citer

- l'élaboration d'une méthode de calcul simple permettant d'évaluer directement la force optimale de glissement.
- l'élaboration pour la courbe caractéristique du dissipateur d'un modèle analytique mieux fini qui inclue l'influence de la vitesse et qui se traduit par le passage d'une courbe rectangulaire pour les petites vitesses à une courbe concave pour les grandes vitesses.
- la recherche de dissipateurs semblables, utilisant le frottement à sec comme mécanisme hystérétique de dissipation d'énergie mais de conception plus simple et donc plus facile à fabriquer.
- l'élaboration d'une méthode d'entretien et de maintenance du dispositif. En effet, le dispositif étant mis en place pour de longues périodes, il devient nécessaire d'examiner son évolution au cours du temps.

Les systèmes de contrôle structural passif dont fait partie le dissipateur à frottement étudié, peuvent être considérés dans l'état actuel comme une solution optionnelle. Mais le nombre d'études qui sont faites dans ce domaine, le nombre croissant des applications pratiques et le retour d'expériences laissent entrevoir que dans le futur, ces systèmes ne manqueront pas de devenir une solution incontournable devant être utilisée chaque fois qu'une maîtrise accrue du comportement dynamique des bâtiments et par conséquent une réduction élevée du risque sismique sont exigées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Teramoto T. , Ouakli A. : “ Seismic response control using friction dampers ”
Thesis submitted to the fulfilment of post-graduated diploma. BRI ISSEE. Japan,
July 1989.
- [2] Ouakli A. : “ Seismic response control of structures by energy absorbing devices ”
Proceedings of the of the participants’ thesis. International institute of seismology
and earthquake engineering. Vol. 25. pp 207 - 222. Japan, December 1989.
- [3] Ouakli A. : “ Seismic response control of building structures by friction dampers.”
CRAAG Symposium 2000. Abstract book p. 55. Algiers, 09, 10 ,11 October 2000.
- [4] Teramoto T., Kitamura H., Araki K., Takada K. : “ Application of friction damper
to high rise buildings ”. Prereport, 13th Congress of IABSE. Helsinki, June 1988.
- [5] Newmark N. M., Rosenblueth E. : “ Fundamentals of Earthquake Engineering”
Prentice Hall. N.J., 1971.
- [6] Clough R., Penzien J.: “ Dynamics of structures ”.
Mc Graw Hill Book Company, Inc. 1975
- [7] Levy S., Wilkinson J. P. D. : “ The component Element Method in Dynamics
With Application to Earthquake and Vehicle Engineering”. Mc Graw Hill Book
Company, Inc. 1976.
- [8] Alonso M., Finn E. J. : “ Physique générale”. Tome 1 - Mécanique. Addison-
Wesley Publishing Company, Inc. 1970.
- [9] Housner G.W. and Al, : “ Structural Control: Past, Present and Future”. American
Society Of Civil Engineers, Journal Of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 9,
September 1997.

- [10] Soong T. T., : “ Active Structural Control in Civil Engineering”. National Center For Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo. Technical report NCEER -87-0023. November 11, 1987.
- [11] Bouquin F. : “ Vers un contrôle actif des structures de génie civil”. Annales des Ponts et Chaussées ENPC, No. 83, pp15 - 21. Août 1997.
- [12] Lin R. C., Liang Z., Soong T. T., Zhang R. H. : “ An experimental study of seismic structural response with added viscoelastic dampers”. National Center For Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo. Technical report NCEER -88-0018. June 30, 1988.
- [13] Kelly J. M., Skinner R. I., Heine A. J.: “ Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures”. Bulletin Of New Zealand Society For Earthq. Engineering, Vol5, No.3, pp 63 - 88. September 1972.
- [14] Kelly J. M., Tsztoo D. F. : “ The development of energy absorbing devices for aseismic base isolation systems”. Report No. UCB/EERC - 78/01. Earthquake Engineering Research Center. January 1978.
- [15] Kelly J. M., Skinner M. S. : “ The design of steel energy absorbing restrainers”. Report No. UCB/EERC - 79/10, Vol. 4 . Earthquake Engineering Research Center. February 1979.
- [16] Kelly J. M., Tsztoo D. F. : “ Earthquake simulation testing of a stepping Frame with energy absorbing devices”. Bulletin Of New Zealand Society For Earthquake Engineering, Vol. 10, No. 4, pp 196 - 207, December 1977.
- [17] Tyler R.G.: “ Preliminary tests on an energy absorbing elementy for braced structures under earthquake loading”. Bulletin Of New Zealand Society For Earthquake Engineering, Vol. 16, No. 3, pp 201 - 212, September 1983.
- [18] Tyler R.G., Heine A. J. : “ Tests on an axially loaded steel energy absorber”. Bulletin Of New Zealand Society For Earthquake Engineering, Vol. 17, No. 1, pp 47 - 55, March 1984.
- [19] Tyler R.G.: “ Further Notes on a steel energy absorbing element for braced frameworks”. Bulletin Of New Zealand Society For Earthquake Engineering, Vol. 18, No. 3, pp 270 - 279, September 1985.
- [20] Key D. E.: “ The seismic performance of energy absorbing dampers in buildings structures”. Bulletin Of New Zealand Society For Earthquake Engineering, Vol. 17, No. 1, pp 38 - 46, March 1984.
- [21] Tyler R.G.: “ Test On Brake Lining Damper For Structures”. Bulletin Of New Zealand Society For Earthquake Engineering, Vol. 18, No. 3, pp 280 - 288, September 1985.

- [22] Boardman P. R., Wood B. J., Carr A.J. : “ A cross braced structure with energy dissipators”. Bulletin Of New Zealand Society For Earthquake Engineering, Vol. 16, No. 2, pp 83 - 97, June 1983.
- [23] Filiatrault A., Cherry S. : “ Performance Evaluation of Friction Damped Braced Steel Frames Under Simulated Earthquake Loads”. Earthquake Spectra, The Professional Journal of the E.E.R.I., Vol. 3, No. 1, pp 57 - 78, February 1987.
- [24] Filiatrault A., Cherry S. : “ Seismic design of simple friction damped braced frames”. Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering Japan, Vol. V, No. 7-10-9 pp V 809 - V814, August 1988.
- [25] Bergman D. M., Hanson R. D. : “ Characteristics of mechanical dampers”. Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering Japan, Vol. V, No. 7-10-10 pp V 815 - V819, August 1988.