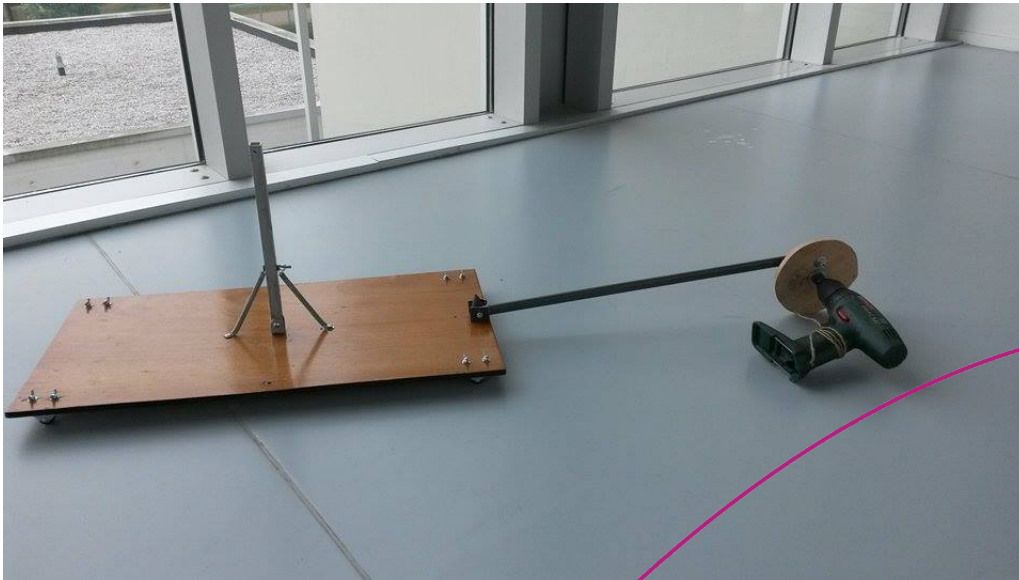


Etude des mouvements d'une structure lors d'un séisme



Enseignant responsable
Didier VUILLAMY

Étudiants :
Célia TERKI
Andréa JULIER
Ingrid FIQUET

Christopher WINGEL
Victor SAVIGNY
Maxime NUTTE

Date de remise du rapport : 14/06/15

Référence du projet : STPI¹/P6/2015-16

Intitulé du projet : Etude des mouvements d'une structure lors d'un séisme

Type de projet : Bibliographie, modélisation, conception

Objectifs du projet :

Lors de la réalisation de ce projet, nous avons pour but d'étudier les mouvements d'une structure lors d'un tremblement de terre. Pour y arriver, nous étudierons d'abord les mécanismes des séismes, ainsi que les moyens mis en œuvre par les hommes pour concevoir des ouvrages parasismiques. Ensuite, nous mettrons au point un modèle théorique visant à comprendre les déformations d'une structure simple lorsque cette dernière est soumise à une excitation périodique. Nous effectuerons également des simulations numériques pour observer les mouvements de ce système. Grâce à cela, nous connaissons les principaux paramètres influençant ces mouvements, et lesquels peuvent conduire à l'effondrement de la structure. Enfin, nous concevrons et fabriquerons un modèle expérimental pour confronter notre modèle théorique à la réalité. Les résultats de cette expérience permettront d'avoir une vue globale et plus juste des mouvements réels d'une structure.

Remerciements :

Nous tenons à remercier tout particulièrement M.Vuillamy de nous avoir encadrés tout au long de notre projet, pour son aide et sa disponibilité, et pour les nombreuses connaissances qu'il a pu nous transmettre.

Nous remercions également M.Breteau pour le perçage de la lame de la scie sabre.

Et enfin, un grand merci à M.Williams de nous avoir assistés dans la conception de la maquette.

1. INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE ROUEN
DÉPARTEMENT SCIENCES ET TECHNIQUES POUR L'INGÉNIEUR
685 AVENUE DE L'UNIVERSITÉ BP 08- 76801 SAINT-ETIENNE-DU-ROUVRAY
TÉL : 33 2 32 95 66 21 - FAX : 33 2 32 95 66 31

Table des matières

Introduction	4
1 Méthodologie, organisation du travail	5
1.1 Description de l'organisation du travail, méthodologie	5
1.2 Organigramme de répartition des tâches	5
2 Bibliographie sur les séismes	6
2.1 Les séismes	6
2.1.1 Origines, causes et caractéristiques	6
2.1.2 Échelle de Richter	7
2.1.3 Ondes sismiques	7
2.2 Comportement des structures soumises à des séismes	8
2.2.1 Déformation des bâtiments	8
2.2.2 Résonance des matériaux	9
2.2.3 Influence de la hauteur	10
2.2.4 Influence de la masse	11
2.3 Les constructions parasismiques	11
2.3.1 Définition et objectifs	11
2.3.2 Les normes de la construction parasismique	12
2.3.3 Les principes de construction des structures parasismiques	12
2.3.4 L'architecture du bâtiment parasismique	12
2.3.5 Constructions parasismiques au Japon	14
3 En route vers un modèle informatique	17
4 La conception	19
4.1 Réalisation de la maquette	19
4.2 Présentation des méthodes utilisées pour déterminer expérimentalement les paramètres de notre système.	20
4.2.1 Raideur du ressort	20
4.2.2 La fréquence	20
4.2.3 Vitesse angulaire	21
4.3 Exploitation des mesures et résultats du modèle informatique	22
4.3.1 Première manipulation : Variation de la fréquence	22
4.3.2 Deuxième manipulation : Variation de la masse	24
4.3.3 Troisième manipulation : Variation de la position de la masse	24
Conclusion et perspectives	26
Bibliographie	27
A Schéma du montage	29

Introduction

Dans la continuité de ce qui a été fait au semestre précédent et dans l'optique de notre futur métier d'ingénieur, nous avons réalisé au cours de ce quatrième semestre un projet de physique. Ce projet revêt une importance particulière puisqu'il permet de mettre en pratique les connaissances que nous avons acquises au sein de ces deux dernières années mais aussi de réfléchir autour d'une problématique concrète, ce que tout futur ingénieur aura à faire.

Nous avons donc choisi de nous intéresser aux séismes et plus particulièrement aux mouvements d'une structure lors d'un séisme. Rappelons que lors d'un séisme, de l'énergie est libérée et dissipée sous forme d'ondes sismiques, fragilisant les structures et mettant en danger les vies humaines.

C'est donc lors de la première séance, que, notre enseignant responsable, M.Vuillamy, nous a fait part des enjeux d'un tel sujet et de ses attentes, notamment avec la réalisation d'une maquette.

Notre travail s'est par la suite articulé autour de trois phases. Nous avons tout d'abord fait un travail de recherche sur les séismes en nous intéressant aux séismes en général, aux dégâts occasionnés par ces derniers et enfin aux constructions parasismiques. Nous avons ensuite abordé une étape de modélisation avec la réalisation d'un programme Excel traduisant le mouvement d'une structure. Puis nous sommes passés à la phase de conception afin de confronter le modèle numérique et la maquette. Ce rapport est organisé selon l'ordre annoncé.

Chapitre 1

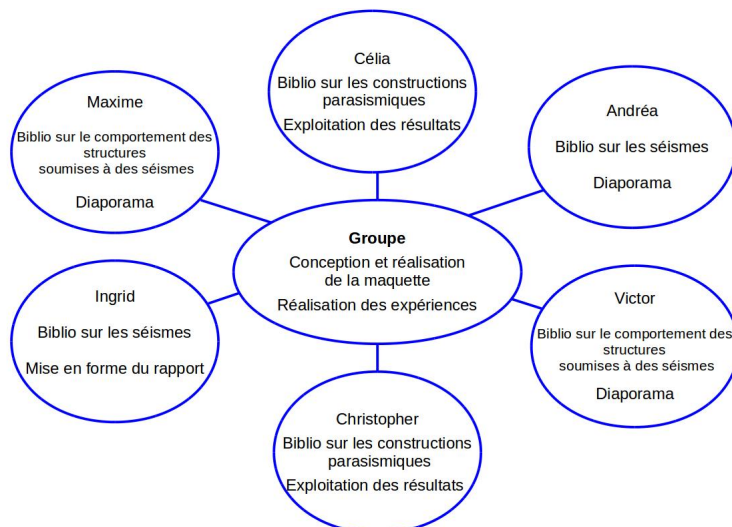
Méthodologie, organisation du travail

1.1 Description de l'organisation du travail, méthodologie

Au cours de cet EC, nous avons commencé par séquencer notre projet. La première séance, M. Vuillamy nous a fait part de ses attentes concernant le travail à fournir. Les séances suivantes, nous nous sommes mis d'accord sur la façon dont nous souhaitions concevoir notre maquette. Nous avons choisi la forme de notre structure, la façon de la déplacer, et les matériaux que nous pourrions utiliser pour la fabriquer. Nous avons ensuite établi ensemble, avec l'aide de notre professeur, les équations mathématiques reliant les paramètres variables de ce système, ce qui a duré trois séances. Parallèlement, nous avons commencé à mener des recherches bibliographiques pour notre rapport, ce qui nous a également permis de mieux comprendre notre sujet et ses enjeux. Il nous a également fallu deux séances pour nous familiariser avec le programme de simulation informatique fourni par notre professeur, utilisant les équations que nous avons trouvées précédemment.

Nous nous sommes ensuite attelés à la fabrication concrète de notre maquette : choisir le matériel dont nous avons besoin, et enfin construire notre système. Cela nous a pris trois séances en cours ainsi que des jeudi après midi. Par la suite nous avons dû modifier notre système. Une fois la maquette définitive fabriquée, nous avons effectué différentes manipulations que nous avons filmées. Par nécessité d'avoir accès aux machines de l'atelier, nous avons choisi de travailler sur l'aspect expérimental durant nos séances, et d'écrire le rapport chez nous, en partageant l'avancée de notre travail écrit chaque semaine.

1.2 Organigramme de répartition des tâches



Chapitre 2

Bibliographie sur les séismes

2.1 Les séismes

2.1.1 Origines, causes et caractéristiques

Un séisme est une rupture brutale au niveau du foyer, libérant de l'énergie, à l'intérieur de la croûte continentale. L'énergie est ensuite dissipée sous deux formes. Elle est libérée sous forme de chaleur et sous forme d'ondes sismiques. Les ondes sismiques partent dans toutes les directions au niveau du foyer qui se situe sous la surface, jusqu'à sept cent kilomètres de profondeur. On retrouve trois types d'ondes : les ondes primaires (P), les ondes secondaires (S) et les ondes de surfaces (L) qui elles sont les plus dangereuses. Tous les jours on enregistre de nombreux séismes mais seulement très peu se font ressentir. La plupart des séismes se produisent à l'intersection de plaques tectoniques mais rarement à l'intérieur des plaques. Pour mettre cela en évidence, on peut mettre en parallèle deux cartes du monde, l'une montrant le découpage des plaques et l'autre les zones à forte activité sismique.

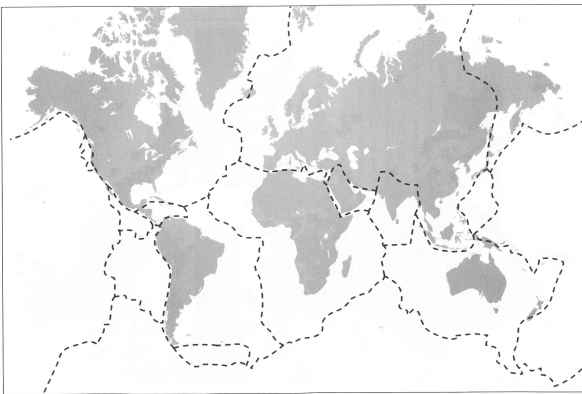


FIGURE 2.1 – *Plaques lithosphériques*

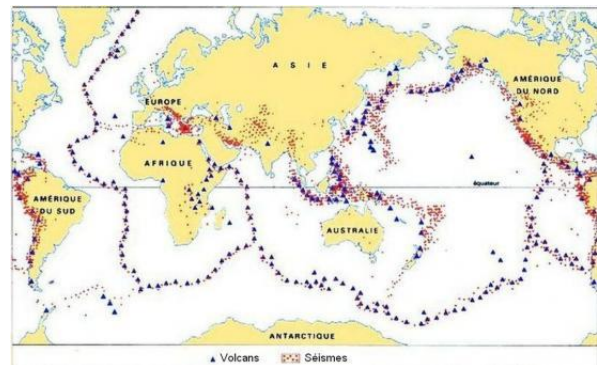


FIGURE 2.2 – *Activité sismique*

Un séisme se produit à la suite d'une rupture brutale au niveau d'une faille. Une faille étant une cassure de la croûte terrestre qui sépare les blocs rocheux en deux. C'est à dire qu'il y a déplacement brusque de blocs rocheux solides. Il se trouve que sur de longues périodes des forces s'exercent en continu dans les failles qui restent bloquées, déformant les roches de façon élastique sans pour autant en arriver à la cassure. Cependant après une longue période se produit la rupture et toute l'énergie emmagasinée sur cette longue période qui peut être de plusieurs siècles se libère. Et ensuite la faille est de nouveau bloquée et ainsi de suite : c'est le cycle sismique. A chaque rupture un séisme.

Un séisme peut avoir quatre origines :

- Rupture d'une faille
- Intrusion et dégazage d'un magma

- Craquements des calottes glaciaires
- Explosion, effondrement d'une cavité

On regroupe quatre catégories de séismes :

Séismes tectoniques : Ce sont les plus fréquents et les plus dramatiques. Ils se situent souvent à l'intersection de deux plaques. Les causes sont la subduction (il y a glissement d'une plaque par dessus l'autre), la collision, ainsi que l'apparition de rift (la croûte terrestre s'amincit, ce qui mène à une rupture lithosphérique).

Séismes d'origine volcanique : Ceux-ci résultent de l'accumulation de magma dans les volcans et il y a des ruptures dues aux roches comprimées. Ils sont donc provoqués par des fractures et par les mouvements des roches poussées par le magma qui se fraie un chemin vers la surface.

Séisme d'origine polaire : Ils sont dus aux cassures des glaciers qui se produisent lorsque l'avancée des coulées de glace est irrégulière. Le nombre de séismes de ce type est en hausse depuis plusieurs années, à cause du réchauffement climatique.

Séismes d'origine artificielle : Ces séismes induits sont dus à certaines activités humaines telles que les barrages, les pompages profonds, l'extraction minière, les explosions souterraines, ou même les bombardements. Ils sont relativement fréquents et de faible amplitude.

2.1.2 Échelle de Richter

L'échelle de Richter est une échelle sismique de référence, établie en 1935. Elle a pour but d'évaluer la puissance d'un séisme, c'est à dire l'énergie libérée à son foyer. On associe ainsi aux séismes une valeur pouvant aller de 1 à 9, qu'on appelle la magnitude. Cette échelle est logarithmique : à titre d'exemple, un séisme de magnitude 7 est dix fois plus puissant qu'un séisme de magnitude 6.

Mathématiquement, la magnitude dite de Richter est le logarithme de l'amplitude mesurée des ondes de volume, à 100 kilomètres de l'épicentre. La magnitude locale est définie par la formule suivante : $M_l = \log(A) - \log(A_0)$, où A représente l'amplitude maximale relevée par le sismographe, et A_0 une amplitude de référence.

Depuis 1900, on a répertorié 28 séismes de magnitude supérieure à 8.

Le séisme de plus grande amplitude mesuré depuis 1900 se positionne à 9,5 sur l'échelle de Richter. Il s'est produit au Chili en 1960, à Valdivia. Il a engendré un tsunami qui a ravagé non seulement la côte chilienne mais également Hawaï, 11 000 km plus loin.

2.1.3 Ondes sismiques

Les séismes sont créateur d'ondes sismiques, elles sont de nature élastique et se propagent dans toutes les directions de l'espace. On répertorie deux grands types d'ondes lors d'un tremblement de terre : les ondes de volume (traversant la Terre) et les ondes de surface (se propageant parallèlement à la surface).

Ondes de volume

Ces ondes suivent les lois de l'optique géométrique, elles se réfléchissent au niveau des surfaces de discontinuité et ce sont elles qui vont donc créer des ondes de surface. Et parmi les ondes de volume on compte les ondes P et les ondes S.

Ondes P (dites ondes primaires) : Ce sont des ondes de type longitudinal (ou ondes de compression), c'est à dire que lorsqu'elles se propagent, le milieu va subir une suite de dilatations et de compressions dans la direction de la propagation de l'onde. Ce sont les premières ondes que l'on enregistre sur un sismographe.

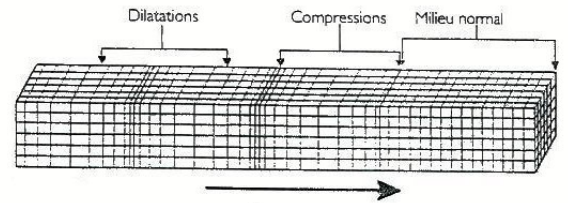


FIGURE 2.3 – Ondes P

Ondes S (dites secondaires) : Ce sont des ondes transversales (ou ondes de cisaillement), c'est à dire que lorsqu'elles se propagent, le milieu va subir un mouvement perpendiculaire au sens de propagation de l'onde. Elles se propagent partout sauf dans les milieux liquides. Elles sont plus lentes que les ondes P et donc sont enregistrées en deuxième.

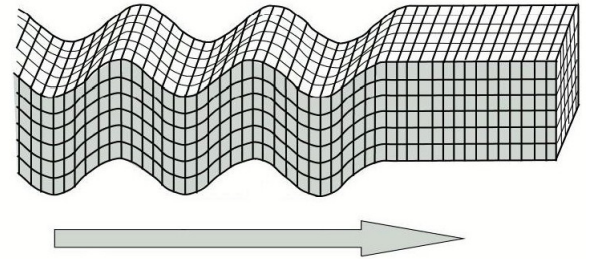


FIGURE 2.4 – Ondes S

Ondes de surface

Ces ondes se propagent à la surface de la Terre, elles sont plus lentes que les ondes de volume mais leur amplitude est plus forte. Elles concentrent davantage d'énergie. On note deux types d'ondes :

Les ondes de Love : Ce sont des ondes transversales polarisées. Elles ne se propagent que dans des solides non homogènes. Elles se déplacent horizontalement en provoquant des ébranlements horizontaux, ce sont des ondes qui causent d'importants dégâts par cisaillement au niveau des fondations des bâtiments.

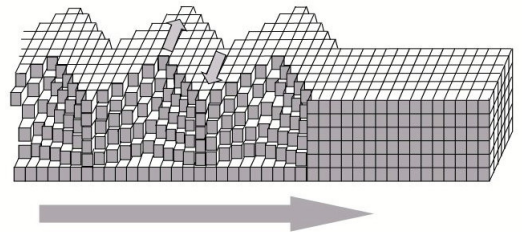


FIGURE 2.5 – Ondes de Love

Les ondes de Rayleigh : Ces ondes sont des résultantes des interférences entre les composantes verticales des ondes P et S. Le déplacement est donc à la fois vertical et horizontal. Ces mouvements sont ressentis de manière très forte par les structures construites sur ces sols ayant ce mouvement à la fois vertical et horizontal.

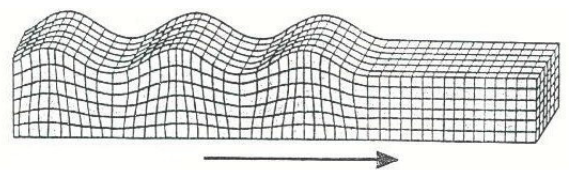


FIGURE 2.6 – Ondes de Rayleigh

2.2 Comportement des structures soumises à des séismes

2.2.1 Déformation des bâtiments

En situation de séisme, les différents éléments d'un bâtiment sont tous soumis à une force identique, la « poussée » des secousses à un moment donné. Cependant, ils se déforment de manière différente, en fonction de plusieurs facteurs : leurs formes (un poteau se déforme plus qu'un mur), leurs matériaux (le bois se déforme plus que le béton armé), leurs masses (qui engendrent des forces d'inertie différentes) et la nature des liaisons entre les éléments. Les secousses d'un séisme génèrent

des forces alternées dans toutes les directions, forces qui déforment le bâtiment de façon aléatoire, mais selon ses caractéristiques architecturales.

Les déformations peuvent être de deux sortes. Premièrement, il y a les déformations élastiques, sensiblement proportionnelles à la force qui les provoque. Ces dernières sont réversibles, c'est à dire qu'elles disparaissent après la suppression des charges qui les ont provoquées. Ces déformations n'auront donc pas les conséquences les plus graves. Mais pour chaque sollicitation et chaque corps, il existe une force limite fixée ; au-delà de celle-ci, les déformations cessent d'être élastiques : c'est la limite d'élasticité. Lorsque la force appliquée dépasse cette limite, une partie de la déformation subsiste après l'arrêt de l'action extérieure : on parle alors d'une déformation plastique (ou post-élastique), qui elle sera permanente.

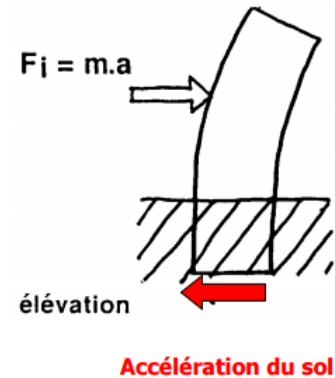


FIGURE 2.7 – Effet des forces d'inertie

On distingue plusieurs types de déformations, selon si elles se font sous l'effet de contraintes normales (traction ou compression, qui suivent une loi linéaire) ou composées (flexion, c'est-à-dire des efforts de traction et de compression dans le sens longitudinal de l'élément, cisaillement, dans le sens diagonal, ou torsion, où les contraintes ne sont pas homogènes). Vis à vis des mouvements du sol, les structures se comportent comme des oscillateurs dont les modes propres d'oscillation dépendent notamment de la raideur (ou rigidité) des éléments de la structure. Cette raideur dépend de quatre paramètres modifiables par le constructeur : la nature des liaisons de l'élément, la nature de son matériau, sa section et son élancement.

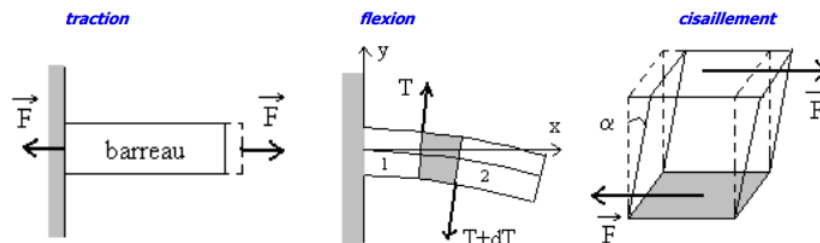


FIGURE 2.8 – Différents types de déformation d'un bâtiment

2.2.2 Résonance des matériaux

Les immeubles, plus particulièrement ceux en forme de tour et de gratte-ciel, présentent la particularité, en cas de séisme, de pouvoir entrer en résonance. Cela signifie que lorsqu'on fait vibrer une structure à une certaine fréquence, qui dépend de ses caractéristiques géométriques (longueur, largeur, hauteur) et mécaniques (masse, rigidité), elle peut réagir en amplifiant considérablement les vibrations et oscillations. Cette fréquence est appelée fréquence de résonance. C'est la fameuse histoire, non véridique mais plausible, des soldats marchant en cadence sur un pont métallique : la cadence de leurs pas étant la même que la fréquence de résonance du pont, les vibrations générées auraient été trop importantes pour ce dernier, qui se serait effondré. . .

Pour un immeuble soumis à un séisme, il en va de même : en effet, les ondes sismiques sont complexes et peuvent être considérées comme la superposition d'ondes de différentes fréquences. Si ces fréquences correspondent à la fréquence de résonance de l'immeuble, celui-ci va être sollicité de façon importante et se déformer, donc risquer de subir des dégâts. La période de résonance des

immeubles — l'inverse de la fréquence de résonance — est principalement fonction de la hauteur de l'immeuble : plus l'immeuble sera élevé, plus sa période de résonance sera grande.

L'ordre de grandeur des périodes de résonance pour les immeubles est de quelques secondes. Or, même à des centaines de kilomètres de distance d'un fort séisme, les ondes sismiques présentent une énergie importante dans le domaine de périodes allant de 0.5 secondes à 5 secondes, donc englobant les périodes de résonance des immeubles.

A une fréquence plus basse ou plus élevée, le phénomène s'atténue et les oscillations diminuent : la fréquence de résonance est la fréquence à laquelle l'amplitude des oscillations atteindra un pic. Pour ce qui est de notre expérience, on peut donc distinguer trois cas :

- A une fréquence inférieure à la fréquence de résonance, l'amplitude des oscillations augmentent avec la fréquence.
- Lorsque la fréquence de résonance est atteinte (ou très proche), l'amplitude des oscillations est à son maximum.
- Puis, quand on a dépassé la fréquence de résonance, augmenter la fréquence diminuera l'amplitude.

2.2.3 Influence de la hauteur

Un autre élément important à prendre en compte est la hauteur du bâtiment. En effet, comme dit précédemment, lors d'un séisme, les structures vont avoir tendance à se comporter, d'une certaine manière, comme des oscillateurs.

Rappelons quelques notions sur les oscillations, prenons pour cela l'exemple du pendule simple :

- T période : durée de l'oscillation
- f Fréquence : nombre d'oscillations par seconde
- A Amplitude : Élongation maximale
- m : Masse du pendule
- l : Longueur du pendule
- g : accélération de la pesanteur

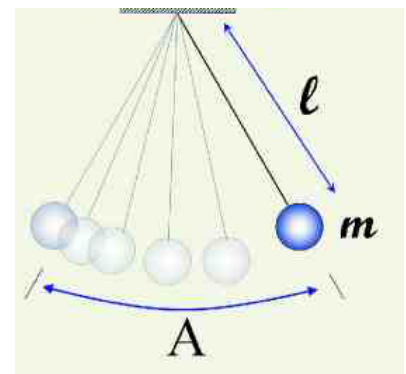


FIGURE 2.9 – Schéma d'un pendule simple

A l'aide d'un bilan des forces, nous pouvons arriver à la formule suivante : $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. Nous pouvons donc voir que la durée d'oscillation du pendule simple dépend uniquement de la longueur et est totalement indépendante de la masse et de l'amplitude de celle-ci. De plus, nous savons qu'un séisme va imposer une oscillation à notre bâtiment. Ainsi, nous pouvons supposer que la fréquence propre d'un bâtiment est dépendante de sa hauteur. Plus le bâtiment sera grand, plus sa fréquence propre sera faible. Grâce à de nombreuses expériences, les scientifiques ont pu déterminer une formule empirique très simplifiée afin d'évaluer la fréquence propre d'un bâtiment en fonction de sa hauteur. Elle équivaut à $f = 10/n$; n étant le nombre d'étages. Nous pouvons estimer qu'un immeuble de 10 étages aura donc une fréquence propre de 1 Hz. Celui-ci aura des risques de rentrer en résonance si les fréquences des ondes du séisme coïncident, augmentant l'amplitude des oscillations du bâtiment et pouvant provoquer sa rupture. Ainsi, nous voyons que la hauteur d'un bâtiment est très importante lors de sa conception, celle-ci influençant directement sa fréquence propre et donc le risque d'entrer en résonance. Cependant, la hauteur n'est pas le seul facteur déterminant la fréquence propre d'une construction.

2.2.4 Influence de la masse

Un autre paramètre important modifiant la fréquence propre est la masse du bâtiment. Même si nous venons de voir que la période propre d'un pendule simple dépend uniquement de la longueur de celui-ci, le comportement d'un bâtiment lors d'un séisme dépend également de sa masse. En effet, le phénomène de résonance est un phénomène complexe qui met notamment en jeu la masse du bâtiment. Pour comprendre quel rôle joue la masse d'un bâtiment lors d'un séisme, nous pouvons prendre l'exemple d'un pendule inversé.

Si on modélise la construction par un pendule inversé, ce dernier comporte une boule O de masse M située au bout d'une tige flexible fixée au sol. Si la boule est écartée de sa position d'équilibre (comme sur le schéma), la tige va se fléchir ce qui va générer une force de rappel F_r . Cette force sera proportionnelle à la raideur de la tige (k) et la distance d'écart par rapport à la position d'équilibre (x) : $F = kx$

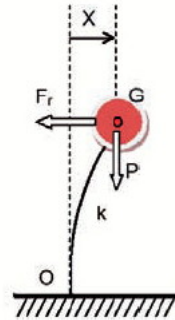


FIGURE 2.10 – Schéma d'un pendule inversé

Dans ce cas-là, la période propre du pendule sera : $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k}}$

D'un point de vue mécanique, un pendule inversé auquel on applique une poussée périodique peut être convenablement assimilé à un bâtiment soumis à un séisme. Ainsi, plus sa masse sera importante, plus sa fréquence propre sera faible. Donc si les ondes du séisme sont lentes, un bâtiment de masse importante entrera en résonance et risquera donc de se briser alors qu'une construction ayant les mêmes dimensions mais un poids plus léger ne subira que de plus faibles oscillations. Nous pouvons donc voir que les deux modèles d'oscillateurs permettent de montrer l'influence qu'ont la masse et la taille d'un bâtiment sur sa fréquence de résonance et ainsi sa réaction lors d'un séisme. Nous pouvons en déduire que les édifices grands et lourds vont avoir des périodes propres faibles alors que les petites habitations plus légères seront sensibles aux ondes sismiques à haute fréquence.

2.3 Les constructions parasismiques

Après avoir présenté les séismes et les dégâts occasionnés par ces derniers, il s'agit maintenant d'introduire les différentes méthodes adoptées afin de limiter au maximum leur impact au sein des structures ainsi que les normes parasismiques. Cette limitation s'obtient par le biais des constructions parasismiques et par certains principes de base.

2.3.1 Définition et objectifs

La construction parasismique ou génie parasismique regroupe l'étude des bâtiments et des structures sujets à des sollicitations de type séismes. Elle s'intéresse également à la réalisation d'infrastructures résistant aux tremblements de terre ainsi qu'au développement de nouvelles méthodes de construction.

Lors d'un séisme, une perturbation mécanique dans le sol va engendrer dans la structure des sollicitations qui seront alors absorbées dans un bâtiment respectant les normes parasismiques. Grâce à ce type de construction, le bâtiment va osciller et dans le pire des cas se déformer, sans pour autant s'effondrer.

2.3.2 Les normes de la construction parasismique

Suivant les pays, différentes normes parasismiques doivent être appliquées aux constructions pour qu'elles résistent le mieux possible à d'éventuels séismes.

En France, des règles de construction parasismique ont été établies dès 1960. Actuellement, ces normes sont fondées sur les règles européennes Eurocode 8 (EC8), définies dans l'arrêté du 22 octobre 2010 et en vigueur depuis le 1er mai 2011. Elles ont pour objectif principal la sauvegarde du maximum de vies humaines. La construction peut alors subir des dégâts irréparables mais elle ne doit pas s'effondrer sur ses occupants.

2.3.3 Les principes de construction des structures parasismiques

Ces normes posent les bases de la construction parasismique :

- Il faut privilégier les formes compactes et équilibrées par rapport à la longueur et à la largeur du bâtiment.
- Les charges sont homogènes d'un étage à un autre.
- La structure est majoritairement composée d'acier et de métal.
- La position du centre de gravité devrait être la plus basse possible avec une distribution uniforme des masses.
- Il faut éviter que le bâtiment ne rentre en résonance.

2.3.4 L'architecture du bâtiment parasismique

Diviser les formes complexes en formes simples

Les bâtiments possédant une architecture régulière et symétrique se comportent mieux et sont plus résistants que les bâtiments aux formes géométriques complexes.

En effet, les bâtiments aux formes complexes (L,T, etc.) sont moins résistants par rapport aux bâtiments symétriques car la jonction de deux parties formant une pièce complexe est soumise à des contraintes importantes. Chaque forme géométrique possède sa propre réaction. Ainsi, si l'on assemble un bâtiment avec des formes dissymétriques, chaque partie aura une réponse sismique différente, fragilisant alors l'ensemble de la structure et rendant presque impossible la prévision de la réaction du bâtiment lors d'un séisme.

Il faut donc diviser la structure complexe en volumes élémentaires reliés par des joints parasismiques. Par exemple, les bâtiments en L entraînent des concentrations de contraintes locales au niveau des angles qui peuvent être très néfastes.

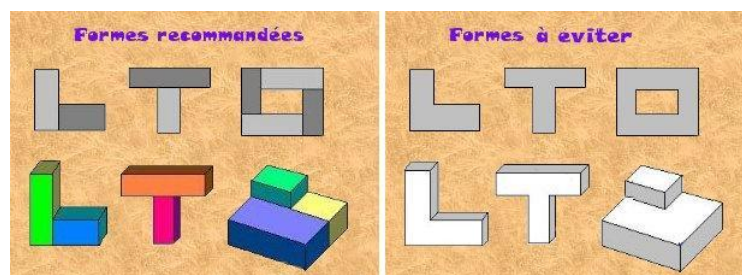


FIGURE 2.11 – Des formes complexes aux formes simples

Les joints parasismiques

On a donc vu dans la partie précédente que les formes complexes étaient divisées en formes simples. Cependant, il ne faudrait pas que ces parties autrefois reliées entre elles et maintenant séparées ne s'entrechoquent. Les joints parasismiques ont donc été créés à cet effet.

Un joint parasismique est situé dans un espace vide de tout matériau entre les différentes parties et sur toute la hauteur d'un bâtiment. Il doit être plan et vertical. Ses dimensions sont calculées en fonctions des déformations possibles des constructions allant, pour les ouvrages classiques, de 4 cm à 6 cm de largeur. Ainsi, grâce à cette largeur de joint, les blocs peuvent bouger séparément sans entrer en collision. Cependant, il faut bien prendre en compte les déformations que les bâtiments peuvent subir. En effet, plus les structures subissent de fortes contraintes et d'importants mouvements horizontaux et plus le joint parasismique devra être large. Dans le cas contraire, le joint parasismique serait inefficace et les bâtiments s'entrechoqueraient. Ces joints vont agir de la façon suivante. Lors d'une perturbation sismique, le bâtiment va osciller et va écraser le joint parasismique qui va alors amortir l'onde et dissiper l'énergie. Ce type de joint se retrouve aussi bien au sein des immeubles que sur des ponts.

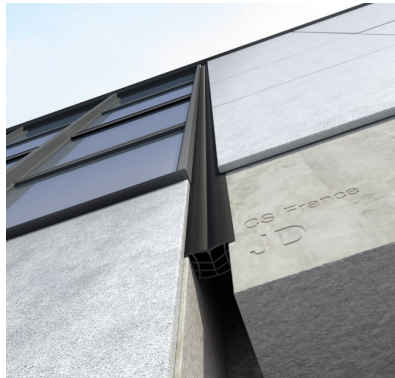


FIGURE 2.12 – Un joint parasismique entre deux bâtiments

Le contreventement

Le contreventement est un aspect très important de la construction parasismique. Il correspond à l'ensemble des dispositifs permettant d'assurer la stabilité d'un ouvrage vis-à-vis des sollicitations horizontales (vent, séisme, choc, freinage, ...) et des sollicitations verticales (masse du bâtiment). Il va transmettre les efforts subis par le bâtiment jusqu'au sol afin qu'ils se dissipent. Il assure donc la stabilité horizontale et verticale des bâtiments lors des secousses.

Dans le cas d'une construction parasismique, le contreventement comporte obligatoirement deux familles d'éléments : le contreventement horizontal et le contreventement vertical.

Le contreventement horizontal : Le contreventement horizontal, également appelé diaphragme (ouvrage plan rigide, horizontal ou incliné transmettant les efforts dans son plan), sert à transmettre les efforts horizontaux sur les éléments du contreventement vertical comme les murs, les travées, etc. (nous ne rentrerons pas ici dans les détails de la transmission des efforts). Les diaphragmes doivent être rigides et sont situés à tous les niveaux (plancher, terrasse, etc.), y compris les charpentes et permettent de raidir les bâtiments, prévenant ainsi le déversement (phénomène d'instabilité affectant une poutre subissant un moment de flexion provoquant le voilement de l'âme de la poutre) des éléments porteurs verticaux.

Le contreventement vertical : Le contreventement vertical, également appelé palée de stabilité, permet de transmettre les efforts vers les fondations du bâtiment, c'est-à-dire que les ondes se propagent vers le bas de la construction (il faudra donc utiliser des solutions constructives au niveau des fondations afin de limiter l'impact des ondes sismiques).

Le contreventement vertical doit être le plus large possible, courant éventuellement sur plusieurs travées, afin d'offrir une meilleure résistance. De plus, les éléments de contreventement doivent être disposés symétriquement par rapport au centre de gravité du niveau. Dans le cas contraire, une position décentrée de ces éléments par rapport au centre de gravité pourrait être à l'origine d'une sollicitation en torsion du bâtiment lors d'un séisme.

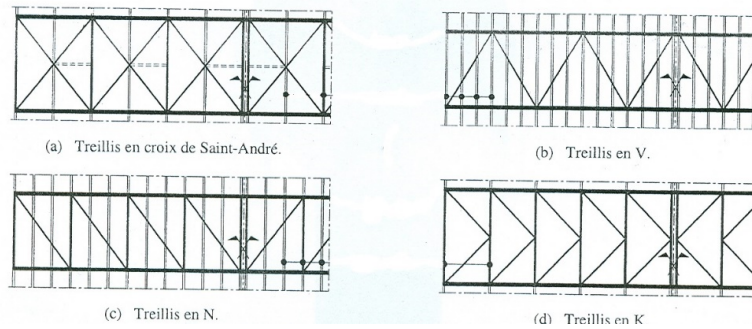


FIGURE 2.13 – *Différents types de contreventement vertical*



FIGURE 2.14 – *Le John Hancock Center est un exemple de structure contreventée capable de résister à des vents violents ou à des tremblements de terre*

Choix des matériaux

Le choix des matériaux de construction influe fortement sur la résistance des bâtiments lors des séismes. Un des points essentiels de la construction parasismique est donc la qualité et la nature des matériaux utilisés.

Lors d'un séisme, les concepteurs vont chercher à ce que le bâtiment se déforme (déformation plastique) sans se rompre : on parle alors de structure ductile. Le béton armé, matériau composite constitué de béton et de barres d'acier, remplit parfaitement ces conditions et c'est d'ailleurs pour cela qu'il représente l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans la construction parasismique, et dans le génie civil de manière générale. En effet, le béton est un matériau rigide capable de supporter des efforts de compression très importants (entre 10 et 100 MPa) alors que sa résistance en traction est dix fois plus faible que celle en compression. Pour pallier à ce déficit, des barres d'acier, pouvant résister en traction (et aussi en torsion) grâce à leur ductilité, sont placées dans les zones soumises à des efforts de traction. Cette association béton-acier va renforcer la structure lors d'un séisme.

Nous allons maintenant présenter diverses méthodes de construction parasismique actuellement utilisées par les japonais. En effet, si les grands principes de construction parasismique sont à peu près identiques dans l'ensemble des pays développés, les Japonais ont développé une multitude de solutions de pointe.

2.3.5 Constructions parasismiques au Japon

Le Japon, secoué en moyenne par 300 séismes chaque année est devenu le pays le mieux préparé pour résister aux tremblements de terre. En effet, la ville de Tokyo est située à 390 kilomètres du foyer sismique du 11 mars 2011. Malgré une magnitude de 8,9, les bâtiments de la Capitale ont bien tenu le choc. Depuis le séisme de Kobe, qui a provoqué plus de 6000 morts en 1995, des mesures gouver-

nementales ont été prises pour revitaliser la recherche dans les systèmes parasismiques. A ce jour, les structures modernes, dont certains gratte-ciels ont complètement intégré les normes parasismiques Japonaises et résistent bien aux secousses. Cela a bel et bien été démontrée par la Tokyo Sky Tree, plus grande tour au monde qui du haut de ses 634 mètres a parfaitement résisté au séisme de 2011.

Isolation parasismique de la base

De plus en plus de bâtiments reposent sur des socles, situés entre les fondations et la structure, qui les isolent des mouvements horizontaux du sol. Ils ont pour but de séparer l'infrastructure (les fondations) qui se déplace avec le sol sans se déformer de la superstructure qui réagit à l'action du sol et se déforme sous l'effet des forces d'inertie (forces opposées à la direction de la déformation). Les isolateurs sont principalement faits de caoutchouc ou d'autres élastomères, combinés à des amortisseurs, des ressorts, des vérins à huile, des rails, des roulements à billes ou encore des cuves d'eau.

Les isolateurs : Ils visent à modifier la période propre du bâtiment, permettant ainsi de désamplifier l'action sismique. En d'autres termes, ces dispositifs vont absorber ou dissiper une partie de l'énergie causée par le séisme pour limiter les mouvements d'oscillation des édifices. Les isolateurs à base de caoutchouc ou d'élastomères sont caractérisés par une grande rigidité verticale et une grande flexibilité horizontale. Cela permet de transmettre les vibrations du sol à la structure en atténuant la fréquence et l'amplitude, pour ainsi diminuer les contraintes subies par le bâtiment.

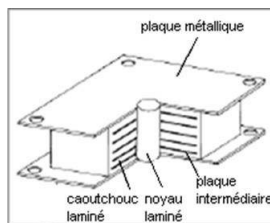


FIGURE 2.15 – Composition d'un isolateur



FIGURE 2.16 – Un isolateur à déformation

Les amortisseurs : Les amortisseurs eux sont utilisés en complément des isolateurs et permettent à la fois de dissiper l'énergie et de limiter l'amplitude des déplacements de la structure. Parmi les amortisseurs, on compte les amortisseurs hystériques et les amortisseurs visqueux. Les amortisseurs hystériques sont constitués de barreaux en acier très ductiles placés verticalement qui, en se déformant, vont dissiper l'énergie. Les amortisseurs visqueux sont quant à eux comparables à des vérins mécaniques.



FIGURE 2.17 – Des amortisseurs hystériques couplés à un isolateur à déformation

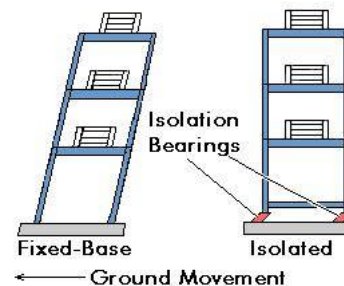


FIGURE 2.18 – Comportement d'une structure isolée à la base

Les vérins hydrauliques : Au Japon, les isolateurs situés sur de grands ouvrages sont souvent combinés à des vérins hydrauliques. Ces mécanismes sont caractérisés par une forte capacité à dissiper l'énergie des vibrations en appliquant une résistance à la structure grâce à l'action d'un piston forcée par un fluide. Le Roppongi Hills, un gratte-ciel de Tokyo de 241 mètres de haut, est installé sur 356 vérins à huile actifs qui diminuent l'intensité des mouvements.

Dissipateur par friction : Une autre technique adoptée par les Japonais est le système à friction, très utilisé sur les ponts. Cette méthode est constituée d'appareils d'appuis glissants, situés entre les piles et le tablier (partie supportant les voies de circulation). Les frottements sont fonction de la pression de contact, de la température ambiante, de l'état de surface de glissement. Lorsque l'amplitude du séisme dépasse la force maximale développée par les frottements, le glissement intervient et une partie de l'énergie du séisme est alors dissipée.

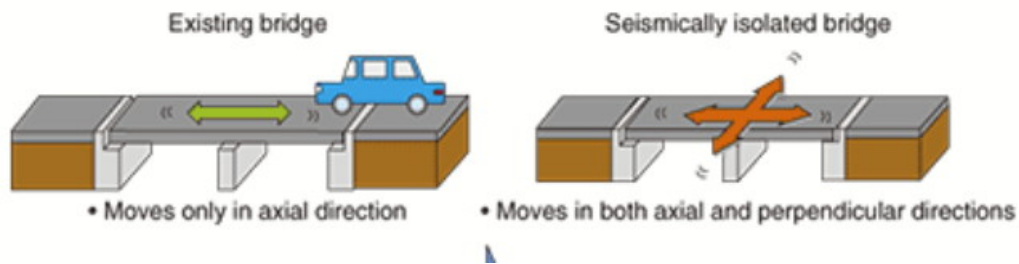


FIGURE 2.19 – Schéma du comportement d'un pont soumis à un séisme sans isolation (à gauche) et équipé de dissipateurs par friction (à droite)

Matériaux flexibles

Nous avons vu précédemment que les bâtiments hauts ont moins d'emprise sur sol et sont plus vulnérables aux secousses. Ainsi, les constructions parasismiques Japonaises visent également à accentuer leur capacité à s'allonger dans se rompre. Les structures métalliques sont par conséquent privilégiées. En effet, le métal se tord, s'allonge et se brise difficilement. En particulier l'acier qui est ductile. On l'utilise pour les poutres et les poteaux, mais aussi pour renforcer les murs en extérieur pour retenir les blocs de béton qui peuvent s'effondrer.

Géométrie des bâtiments

Comme nous avons expliqué précédemment, les formes compactes et équilibrées (H/L) sont privilégiées et les charges d'un étage sur l'autre doivent être homogènes. C'est pourquoi, sur certaines tours très hautes, les Japonais ont ajouté des contrepoids situés au sommet. En plus de ces différentes méthodes antisismiques, des bétons spéciaux ont été développés.

Chapitre 3

En route vers un modèle informatique

Afin d'étudier les mouvements d'une structure dans un séisme, nous avons commencé par chercher un modèle adapté à la situation, et à l'aide de notre professeur nous sommes arrivés à cette première modélisation :

Une barre verticale est fixée au centre d'un plateau à roulettes. Cette barre, articulée en son pied, est fixée sur un socle. De plus, la barre est reliée au plateau par deux ressorts, qui la retiennent dans sa position verticale. Pour simuler l'effet d'un séisme, on soumet le plateau à une excitation horizontale à fréquence variable, ce qui génère une oscillation de la barre.

Dans notre système les paramètres principaux fixés sont :

- Longueur de la barre : L
- Masse de la barre : m
- La position de la masse (distance AM)
- Raideur des ressorts : k
- Masse M à l'extrémité de la barre
- La fréquence du mouvement sinusoïdal

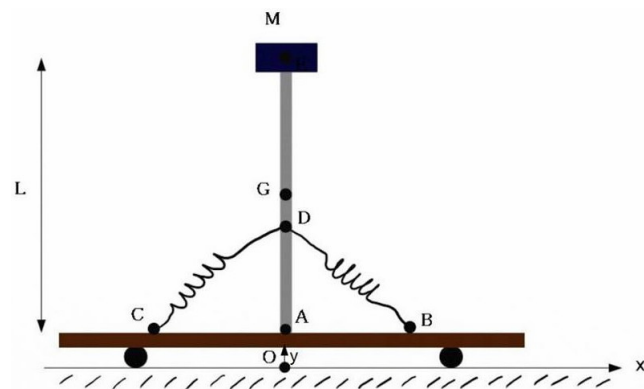


FIGURE 3.1 – Schéma du modèle

En annexe se trouve un schéma du montage illustrant toutes les forces qui entrent en jeu dans cette modélisation (figure A.1)

On va imposer un mouvement de type sinusoïdal au système afin de simuler la mise en mouvement provoquée par un séisme.

A partir de ce modèle informatique, nous cherchons à étudier l'influence d'un séisme. Ce qui nous intéresse principalement est de connaître la variation de l'angle α que fait la barre avec la verticale (voir figure) en fonction du temps. Ainsi, nous pourrions extraire la valeur de l'angle maximal formé entre la barre et le plateau qui illustre les déformations causées par le séisme. Les forces \vec{F}_A et $\vec{F}_{BD}/\vec{F}_{CD}$, qui agissent sur la barre au point A et aux attaches des ressorts sur cette barre, sont également représentatives, nous les étudierons dans le chapitre suivant.

Notre objectif est alors de déterminer une équation différentielle sur α qui définit le mouvement de la barre. On applique le principe fondamental de la dynamique, qui donne l'accélération du centre de gravité de la barre en fonction des efforts appliqués à la barre.

Bilan des efforts du modèle :

- $\overrightarrow{F_{CD}}$: effort du ressort CD sur la barre AE
- $\overrightarrow{F_{BD}}$: effort du ressort BD sur la barre AE
- $\overrightarrow{F_A}$: effort du support sur la barre AE
- $\overrightarrow{F_B}$: effort des roulettes sur le plateau
- $\overrightarrow{F_C}$: effort des roulettes sur le plateau
- $\overrightarrow{F_{ext}}$: effort appliqué de l'extérieur sur CB

A l'aide du PFD, on trouve l'équation de l'accélération du centre de gravité de la barre :

$$m_t \overrightarrow{\gamma_{G_t}} = m_t \overrightarrow{g} + \overrightarrow{F_A} + \overrightarrow{F_{CD}} + \overrightarrow{F_{BD}} \quad (3.1)$$

Et par projection sur les axes x et y on obtient deux autres relations.

Cependant, nous avons plus d'inconnues que d'équations. Nous ne connaissons pas les composantes des efforts des ressorts sur la barre, soit quatre inconnues, ni les composantes de la réaction du plateau sur la barre, soit deux inconnues. Les composantes des efforts des ressorts sont en fait définies par la raideur et l'allongement des ressorts. Mais les points d'accroche des ressorts sont définis par la position de la barre choisie sur le plateau, ainsi on connaît la longueur des ressorts. Ensuite on connaît également la direction des efforts puisqu'on a la position d'accroche des ressorts. Donc on peut déterminer les quatre inconnues qui correspondent aux composantes des efforts des ressorts sur la barre. Au final on possède deux relations avec $\alpha, \ddot{\alpha}, F_{Ax}, F_{Ay}$, ce qui revient à trois inconnues puisque α et $\ddot{\alpha}$ sont liées par une relation d'intégration temporelle. Donc il manque encore une relation.

Elle va s'obtenir en utilisant le moment cinétique \overrightarrow{L} de la barre AE.

D'après le théorème du moment cinétique :

$$\frac{d\overrightarrow{L}_O}{dt} = \sum \overrightarrow{M}_O \quad (3.2)$$

Et au final on obtient :

$$\ddot{\alpha} = \frac{1}{J_{t/A}} [h (X_{11} \cos \alpha - X_{10} \sin \alpha) - l_{gt} m_t g \cos \alpha + m_t l_{gt} \ddot{x}_A \sin \alpha] \quad (3.3)$$

Avec $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_{10}$ et X_{11} définis par :

$$\overrightarrow{F_{BD}} + \overrightarrow{F_{CD}} = \frac{-k(X_1 - bd_0)}{X_1} \begin{pmatrix} X_5 \\ X_6 \end{pmatrix} - \frac{k(X_2 - cd_0)}{X_2} \begin{pmatrix} X_3 \\ X_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{10} \\ X_{11} \end{pmatrix}$$

$$CD = \sqrt{(h \cos \alpha + l)^2 + (h \sin \alpha)^2} = X_1 \quad BD = \sqrt{(h \cos \alpha - l)^2 + (h \sin \alpha)^2} = X_2$$

$$\begin{pmatrix} h \cos \alpha + l \\ h \sin \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_3 \\ X_4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} h \cos \alpha - l \\ h \sin \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_5 \\ X_6 \end{pmatrix}$$

Le déplacement du point A est imposé, donc son accélération est connue. L'équation en $\alpha, \ddot{\alpha}, \ddot{x}_A$ est intégrable par une méthode numérique : la méthode de Runge-Kutta.

Chapitre 4

La conception

Ce chapitre est consacré à l'exploitation des résultats. Dans un premier temps, nous allons présenter les méthodes utilisées pour déterminer expérimentalement les paramètres du système. Puis, la seconde partie est consacrée à la comparaison des résultats informatiques et expérimentaux ainsi qu'à l'exploitation de ces derniers. Nous allons nous intéresser en particulier à l'angle α max et à la force \vec{F}_{CD} , notamment pour mettre en évidence l'influence de certains paramètres sur le mouvement de la structure. Ainsi, nous pourrions valider expérimentalement les théories énoncées dans le chapitre « 2.2 Comportement des structures soumises à des séismes ».

4.1 Réalisation de la maquette

Tout d'abord, nous avons décidé de fabriquer notre maquette à l'aide d'une planche en bois munie de 4 roulettes, avec au centre une ou plusieurs tiges métalliques, maintenues chacune par deux ressorts. (voir schéma) Nous avons envisagé divers systèmes d'excitation possibles, pour faire bouger la structure. Nous avons décidé d'opter pour une perceuse (scie sabre) accrochée à une petite tige métallique, qui elle-même serait attachée à la planche.

Nous avons rencontré des difficultés quant au choix de nos ressorts : en effet, nous avions besoin de ressorts à spires non jointives, pour que ceux-ci puissent être comprimés. Par ailleurs, il nous fallait des ressorts possédant une raideur assez élevée pour tenir la tige métallique correctement. Ne trouvant pas de ressorts correspondants en vente directe, nous avons étendu nos recherches aux entreprises produisant des ressorts. Parmi celles contactées, une n'acceptait pas de produire une quantité si faible, une autre (Masselin) proposait une commande excédant 1000 euros, et une autre (VIT ressorts) 420 euros. Cela était dû au fait que nos ressorts auraient dû être faits sur mesure pour correspondre à nos besoins. Ces prix dépassant nos moyens, nous avons finalement choisi d'utiliser des ressorts de camping à spires jointives, et de les accrocher de manière à ce qu'ils soient en extension au repos, pour pouvoir se comprimer durant les expériences.

Nous avons fabriqué notre maquette en sciant des tiges métalliques de poussette avec une scie à métaux pour qu'elles mesurent 30cm, en les perçant avec une perceuse à colonne. De même, nous avons percé notre planche en bois afin d'y attacher les roulettes, les tiges métalliques centrales et la tige excitatrice. Nous avons également dû poncer les tiges métalliques afin qu'elles mesurent exactement la même taille, pour plus de stabilité. Une fois le système monté, nous nous sommes aperçus que l'ensemble était bancal : la planche étant très légèrement incurvée, une des roulettes ne touchait pas le sol. Pour régler ce problème, nous avons ajouté des rondelles au niveau de la vis la maintenant.

Cependant, une fois le système excitateur monté, nous avons constaté que les mouvements qu'il engendrait étaient trop rapides (fréquence trop élevée), et de trop faible amplitude pour que nous puissions réellement exploiter nos résultats. Nous avons alors décidé de fabriquer un autre système d'excitation. Dans notre nouveau système, on utilise un outil portatif, une perceuse, sur laquelle est montée une roue en contre plaqué, doté d'un pion jouant le rôle d'axe pour une bielle, l'autre extrémité de la bielle étant fixée au plateau. De telle sorte que le mouvement rotatif de la perceuse

se transforme en mouvement de translation de la tige (équivalent du système bielle-manivelle). Ce système nous a permis d'effectuer nos expériences dans de bonnes conditions.

4.2 Présentation des méthodes utilisées pour déterminer expérimentalement les paramètres de notre système.

Pour déterminer les grandeurs qui suivent, nous avons pris chaque manipulation en vidéo. Le logiciel utilisé pour décomposer les vidéos en images est « AVS Video ReMaker ». Les images sont capturées environ toutes les 0,034 secondes, ce qui permet une analyse précise du mouvement. Ensuite, le logiciel que nous avons utilisé pour réaliser des mesures sur les images est « ImageJ ». Nous avons disposé une règle dans le champ de la caméra afin de pouvoir mesurer des distances à l'échelle de la réalité.

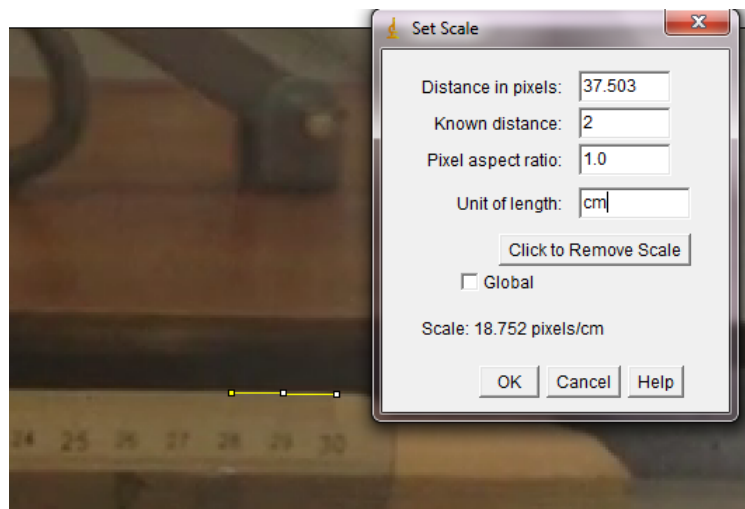


FIGURE 4.1 – Capture d'écran du logiciel ImageJ : paramétrage de l'échelle

A partir de ce paramétrage d'échelle, nous pouvons mesurer les distances et les angles utiles pour déterminer les grandeurs dont nous avons besoin.

4.2.1 Raideur du ressort

Tout d'abord, il faut savoir que pour chaque manipulation, nous avons considéré les deux ressorts comme étant identiques. Par conséquent, nous avons déterminé la raideur d'un seul ressort. Pour ce faire, nous avons exercé une force connue sur le ressort (masse de 0,816 kg) puis, en appliquant la formule de la force d'un ressort nous avons calculé la raideur :

$$k = \frac{F}{l-l_0} = \frac{m \times g}{l-l_0} = \frac{0,816 \times 9,81}{(9,4-8,5) \times 10^{-2}} = 889 N$$

4.2.2 La fréquence

Comme nous l'avons précisé précédemment, le système d'excitation est « motorisé » par une perceuse à fréquence variable. Cependant, la fréquence se régule en fonction de la pression exercée sur le bouton poussoir. Nous ne connaissons donc pas la fréquence que nous imposons. C'est pourquoi pour chaque manipulation, nous déterminons la fréquence à partir de la vidéo. Pour ce faire, nous déterminons la période T du mouvement, qui correspond au temps d'un aller-retour d'un point fixe du système. Ensuite, grâce à la relation $f = \frac{1}{T}$ nous obtenons la fréquence en Hz.

4.2.3 Vitesse angulaire

Pour déterminer la vitesse angulaire, nous mesurons l'angle formé entre la tige et le plateau à un temps t puis à un temps $t + \Delta t$. Nous obtenons la vitesse angulaire en appliquant la relation : $\dot{\alpha} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$ (unité : degré/s)

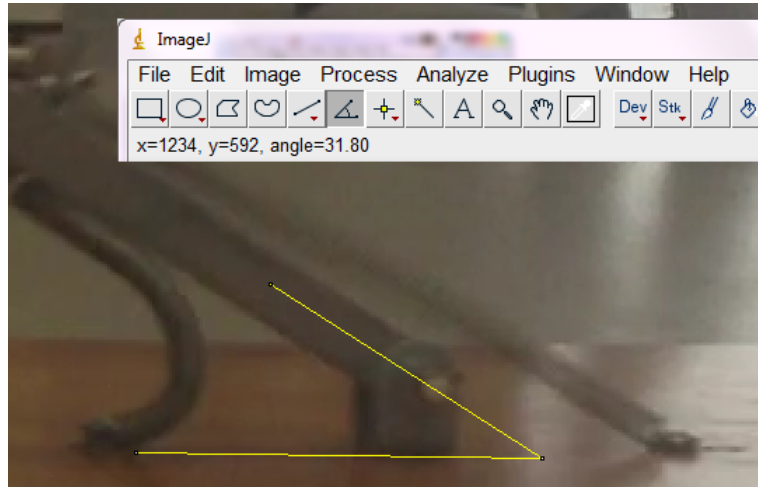


FIGURE 4.2 – Capture d'écran : mesure d'un angle à un temps t

Amplitude déplacement en A

Pour déterminer l'amplitude nous mesurons simplement le déplacement d'un point fixe sur une demi-période $T/2$. C'est une grandeur propre au système d'excitation disque+barre. Par conséquent l'amplitude est la même pour toutes les manipulations.

Angle alpha max

Pour trouver l'angle alpha max, il suffit de capturer l'image à l'instant où l'angle est maximal et de le mesurer grâce au logiciel ImageJ.

Norme de la force F_{CD}

De même, pour déterminer la norme de la force \vec{F}_{CD} maximale, on mesure l'élongation maximale du ressort puis il reste à appliquer la formule $F = k \times (l_{mesuré} - l_0)$ (en N). En effet, la force \vec{F}_{CD} évolue de façon linéaire en fonction de la longueur du ressort :

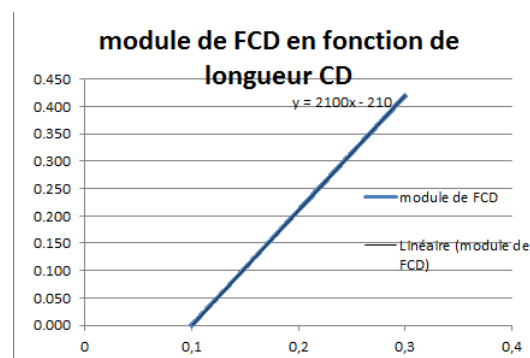


FIGURE 4.3 – Graphique représentant l'évolution du module de la force F_{CD} en fonction de la longueur du ressort.

4.3 Exploitation des mesures et résultats du modèle informatique

4.3.1 Première manipulation : Variation de la fréquence

Paramètres

	Lo (en m)	Longueur tige (en m)	Distance attache ressort AD (en m)	Masse linéique R ₀ (kg/m)	Distance AB ou AC (en m)	Vitesse angulaire de alpha (en °/s)	Raideur ressort (en N/m)	Fréquence excitatoire (en Hz)	AM (m)	Amplitude déplacement de A (m)
Exp 1	0,085	0,30	0,12	0,24	0,06	345	889	2,2	0,3	0,050
Exp 2	0,085	0,30	0,12	0,24	0,06	832	889	2,8	0,3	0,050
Exp 3	0,085	0,30	0,12	0,24	0,06	271	889	3,8	0,3	0,050

Résultats

	Alpha MAX modèle informatique (en degrés)	Alpha max Mesuré (en degrés)	<u>Ecart relatif</u>	FCD modèle informatique max (en N)	FCD mesurée (en N)	<u>Ecart relatif</u>
Exp 1	101,9	114°	12%	43	31,4	27%
Exp 2	116,9	120°	12%	64,2	44,8	30%
Exp 3	112,7	115	2%	45,2	32,02	29,15%

FIGURE 4.4 – Résultats

Pour les 3 manipulations, les écarts relatifs entre les valeurs des forces maximales mesurées et théoriques sont similaires. Cela atteste de l'homogénéité des résultats car cela signifie que pour chaque manipulation, les valeurs numériques et expérimentales sont liées par le même coefficient de proportionnalité. Nous pouvons donc conclure que le modèle numérique traduit bien les mouvements de la réalité. Concernant les écarts relatifs sur les angles maximaux, les valeurs sont de 12% pour les deux premières expériences. En effet, le modèle informatique est considéré parfait. Il ne tient pas compte des éventuels frottements. De plus, ces résultats sont à relativiser compte tenu des multiples incertitudes de manipulation telles que : le traitement informatique, la prise de vidéo, le pesage etc. en d'autres termes, toutes les incertitudes liées à la détermination des paramètres du système. Ainsi, un écart relatif de 12% peut être qualifié de « correct ».

Cependant, l'écart relatif sur l'effort des ressorts est bien trop élevé. Nous avons pensé que cela était lié à la raideur des ressorts non adaptée à l'expérience. En effet, lors de nos manipulations, les ressorts travaillent à la fois en compression et en traction. Seulement, lorsque la vitesse angulaire est élevée, la compression est remplacée au profit d'un flambage du ressort.



FIGURE 4.5 – Photo illustrant le flambage du ressort

De plus, nous pouvons conjecturer que la force du ressort n'est pas linéairement proportionnelle à son allongement. Une des conséquences notables est que la raideur n'est pas constante en raison de la déformation. Afin de valider cette hypothèse, nous avons tracé une courbe représentant l'évolution de l'allongement du ressort en fonction de la masse suspendue.

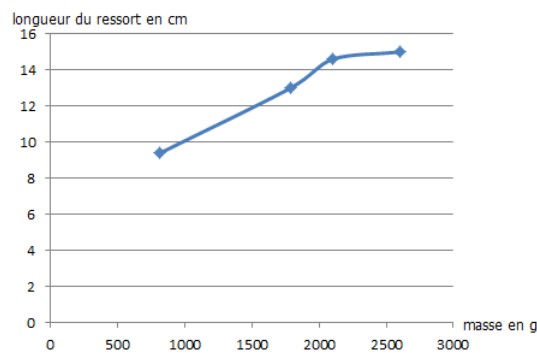


FIGURE 4.6 – Graphique représentant l'évolution de la longueur du ressort en fonction de la masse suspendue

Nous remarquons bien que la droite n'est pas linéaire. Ceci confirme que le coefficient d'élasticité n'est pas constant. Notre maquette ne peut donc pas être utilisée pour des angles très élevés, c'est-à-dire lorsque le système est soumis à des amplitudes très importantes. C'est pourquoi nous n'utiliserons pas par la suite notre maquette pour étudier l'influence de certains paramètres sur les mouvements de la structure.

Exploitations des résultats : influence de la fréquence

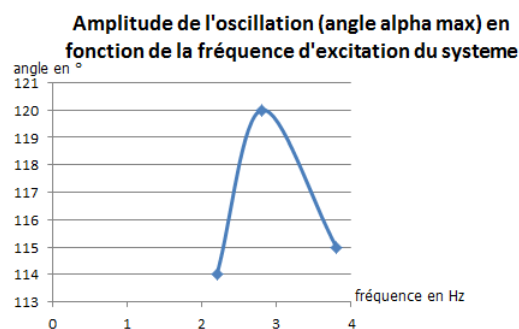


FIGURE 4.7 – Graphique de l'amplitude de l'oscillation en fonction de la fréquence d'excitation

D'après cette évolution, nous pouvons déduire que la fréquence propre de notre système se situe entre 2,8 et 3,8 Hz. En effet, à 3,8 Hz, les oscillations de la tige sont réduites, ce qui signifie que la fréquence propre a été dépassée.

En conclusion, lorsque le système est excité par une fréquence inférieure à sa fréquence propre, les amplitudes augmentent. Lorsqu'il atteint sa fréquence de résonance les amplitudes sont maximales, puis lorsqu'il la dépasse les amplitudes diminuent.

4.3.2 Deuxième manipulation : Variation de la masse

Afin de pouvoir étudier l'influence de la masse, nous devons conserver la même fréquence pour les deux manipulations. Cependant, nous ne pouvons pas imposer la fréquence précise de la perceuse. Cela aurait donc été d'autant plus difficile à réaliser en exploitant les résultats de la maquette. Toutefois, nous avons gardé les paramètres caractéristiques de notre système maquette.

	Vitesse angulaire alpha (en ° /s)	Raideur ressort (en N/m)	Fréquence excitation (en Hz)	Amplitude déplacement A (en m)	Masse M (en kg)	Position de la masse distance AM	Alpha Max (en deg)	Force FCD Max (en N)
Exp 1	345	889	2,2	0,050	0	0,3	101,9	53
Exp 2	345	889	2,2	0,050	0,2	0,3	116	63
Exp 3	345	889	2,2	0,050	0,4	0,3	120	70
Exp 4	345	889	5	0,050	0,4	0,3	111	60

Interprétation

Pour une fréquence inférieure à la fréquence propre d'un système, l'ajout de masse au sommet d'une structure amplifie les mouvements de celle-ci. (exp 1,2,3). Cela augmente donc le risque d'effondrement d'un bâtiment.

Nous allons maintenant voir que l'ajout de masse peut se révéler bénéfique lors d'un séisme à forte magnitude. En effet, l'ajout de masse diminue la fréquence propre d'un bâtiment. Or nous avons vu que les amplitudes sont atténuées lorsque la fréquence propre est dépassée. Pour une masse de 400 gramme, lorsque nous augmentons la fréquence d'excitation du séisme (de 2,2 à 5 Hz), l'amplitude diminue : exp 3 et 4. C'est d'ailleurs une des méthodes utilisées par les Japonais. Cependant, cela peut être quitte ou double car pour des séismes de faible magnitude les dégâts peuvent être ravageurs.

4.3.3 Troisième manipulation : Variation de la position de la masse

Pour l'influence d'un troisième paramètre, nous avons choisi d'étudier la variation de la position de la masse sur une même tige, plutôt que d'analyser le comportement du système lorsque l'on change la hauteur de la barre. Nous justifions ce choix par le fait que lors de la réalisation d'ouvrages, les ingénieurs vont chercher à positionner le centre de gravité du bâtiment de telle sorte que ce dernier puisse résister du mieux possible lors d'un séisme. En effet, dans des zones sismiques, les concepteurs ne vont pas se contenter de construire des bâtiments bas prétextant qu'ils résisteront mieux aux séismes, mais vont également essayer de construire des ouvrages parasismiques hauts.

	Vitesse angulaire alpha (° /s)	Raideur ressort (N/m)	Fréquence excitation (en Hz)	Amplitude déplacement A (en m)	Masse M (en kg)	Position de la masse distance AM (m)	Alpha Max (en deg)	Force FCD Max (en N)
Exp 1	345	889	2,2	0,050	0,4	0,3	120	70
Exp 2	345	889	2,2	0,050	0,4	0,15	155	84
Exp 3	345	889	1	0,050	0,4	0,3	148	81
Exp 4	345	889	1	0,050	0,4	0,15	118	64

Interprétation

Pour les expériences 1 et 2, nous avons déplacé la masse au milieu de la barre pour une forte fréquence. On remarque que l'amplitude des oscillations du système sont plus élevées lorsque le centre de gravité est placé vers le bas. Cela confirme le choix des Japonais de placer les masses au sommet des bâtiments pour de forts séismes. Au contraire, dans les expériences 3 et 4, lorsque la magnitude du séisme est faible, il est préférable de déplacer le centre de gravité vers le bas afin d'atténuer les oscillations. Ainsi, déplacer la masse vers le bas augmente la fréquence propre du système.

Conclusion de la partie expérimentation

Premièrement, en réalisant les expériences nous nous sommes aperçus de l'importance de la prise en compte des incertitudes dans les mesures physiques afin de modéliser la réalité. Puis, nous avons pris conscience de la complexité et des enjeux des métiers liés à la construction parasismique. En effet, il faut prendre en compte à la fois la magnitude du séisme et la fréquence propre de la structure que l'on veut imposer. Cela va donc faire appel à différents corps de métiers tels que les géologues qui vont pouvoir prédire les comportements dynamiques des sols et les ingénieurs en génie civil qui eux, orientent plus leurs recherches sur les comportements dynamiques des structures.

Conclusion et perspectives

Pour conclure, la réalisation de ce projet nous a permis de nous interroger sur la conception des structures soumises à des mouvements qui peuvent être provoqués par des séismes. Mais également de nous faire réaliser un travail de recherche et d'études appliqué sur un sujet précis qui fut très intéressant.

Ce projet s'est révélé être très enrichissant pour nous tous et à tout niveau. Premièrement, lors de la présentation du modèle numérique, M Vuillamy a pris le temps de nous expliquer les étapes du code réalisé en langage Basic sous Excel. Aucun de nous n'était familier avec ce langage, et cela a été très enrichissant, car à la fin nous étions capables de modifier quelques détails tels que l'affichage des résultats calculés par le programme sur une feuille Excel.

Pour terminer, concernant la répartition du travail, tout le monde a participé activement à la réalisation du projet, tout en prenant plaisir à réaliser les parties qui nous intéressaient le plus. Ensuite, la partie la plus intéressante fut celle de l'exploitation des résultats. Pour chaque manipulation, nous avons émis des hypothèses à partir de l'exploitation des résultats obtenus numériquement et expérimentalement. A chaque fois, nous avons eu un regard critique sur nos résultats. Pour finir, nous pouvons dire que cette partie nous a permis de comprendre davantage les enjeux du métier d'ingénieur. A partir de modèles théoriques, nous devons en tant qu'ingénieurs concevoir des modèles expérimentaux corrects afin de solutionner des problèmes techniques, concrets.

Concernant les évolutions de ce projet il pourrait être intéressant de modifier les ressorts de la maquette. En effet, en utilisant des ressorts qui puissent travailler en traction/compression, nous pourrions nous rapprocher d'un modèle parfait afin de se rapprocher du modèle numérique. Aussi, il pourrait être envisagé de concevoir un système plus complexe en lui rajoutant un étage par exemple et de vérifier encore une fois la théorie d'un modèle informatique avec les expériences mais également de confronter ce modèle à celui que nous avons réalisé.

Bibliographie

- [1] <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/techniques/1360/1360-175-p44.pdf> (Valide à la date du 05/06/2015)
- [2] http://colleges.planete-tp.com/IMG/pdf/FR1_sismique_cle735a1f.pdf (Valide à la date du 04/06/2015)
- [3] <http://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/61649/2/Chapitre%20%20R%C3%A9ponse%20%C3%A9lastique.pdf> (Valide à la date du 04/06/2015)
- [4] <http://sismoleron.e-monsite.com/pages/la-sismicite-a-oleron/les-principes-fondamentaux-du-parasismique.html> (Valide à la date du 25/03/15)
- [5] http://cmoiii5.free.fr/parasismique/partie_2.php (Valide à la date du 25/03/15)
- [6] <http://philippe.berger2.free.fr/Bois/Cours/TSC/Contreventement2/contreventement2.htm> (Valide à la date du 26/03/15)
- [7] <http://www.slate.fr/story/35355/japon-seisme-nucleaire-construction-tsunami> (Valide à la date du 12/04/15)
- [8] http://www.prevention2000.org/cat_nat/risques/seisme/besacier/construction_parasismique.htm (Valide à la date du 16/04/15)
- [9] http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/CONCEPTION_PARASISMIQUE_DES_BATIMENTS_no3.pdf (Valide à la date du 16/04/15)
- [10] http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/GA_Conception_parasismique-2.pdf (Valide à la date du 27/04/15)
- [11] <http://tpebatimentsparasismiques.weebly.com/la-structure.html> (Valide à la date du 27/04/15)
- [12] <http://ynycaxiw.webatu.com/earthquake-proof-buildings.php> (Valide à la date du 29/04/15)
- [13] <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201001le2.html> (Valide à la date du 29/04/15)
- [14] <http://www.futura-sciences.com/magazines/terre/infos/dico/d/structure-terre-seisme-3657/> (Valide à la date du 5/05/15)
- [15] <http://www.futura-sciences.com/magazines/terre/infos/dico/d/structure-terre-echelle-richter-2006/> (Valide à la date du 18/05/15)
- [16] <http://www.futura-sciences.com/magazines/terre/infos/dico/d/structure-terre-plaque-tectonique-13874/> (Valide à la date du 18/05/15)
- [17] <http://s-eisme.blogspot.fr/2011/03/seismes-dorigine-artificielle.html> (Valide à la date du 18/05/15)
- [18] http://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9isme_de_1960_%C3%A0_Valdivia (Valide à la date du 18/05/15)
- [19] <http://www.assistancescolaire.com/eleve/4e/svt/viser-une-notion/les-zones-sismiques-dans-le-monde-et-en-france-4sai02> (Valide à la date du 18/05/15)

- [20] <http://musee-sismologie.unistra.fr/comprendre-les-seismes/notions-pour-petits-et-grands/le-risque-sismique/methodes-de-prediction-sismique/> (Valide à la date du 22/05/15)
- [21] http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/Notions_de_base_de_dynamique_des_structures.pdf (Valide à la date du 22/05/15)
- [22] http://www.irma-grenoble.com/PDF/mallettes/sismique/DOC_fiche06.pdf (Valide à la date du 22/05/15)
- [23] http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/3._Le_seisme_et_les_batiments.pdf (Valide à la date du 22/05/15)
- [24] http://cmoiii5.free.fr/parasismique/tpe_entier.php (Valide à la date du 22/05/15)

Annexe A

Schéma du montage

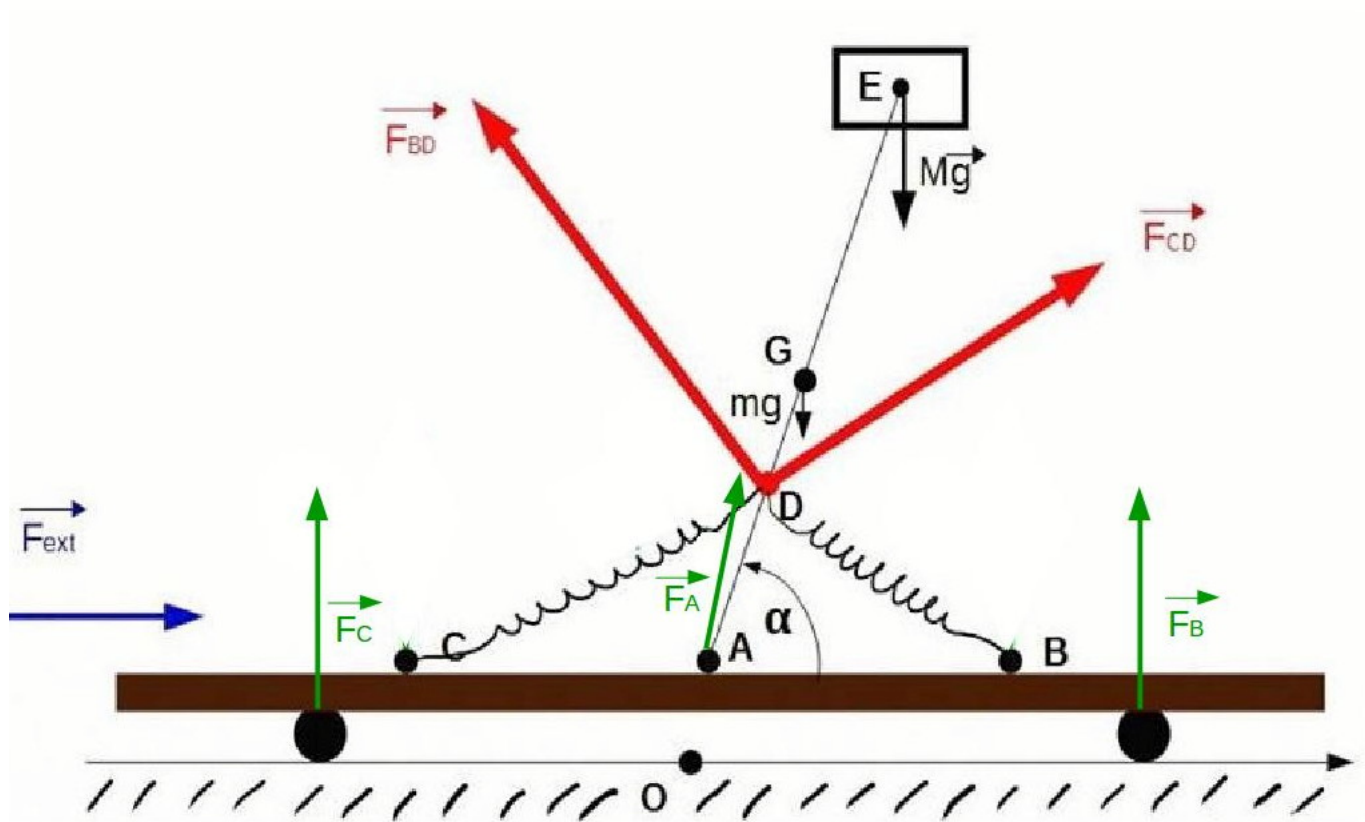


FIGURE A.1 – Forces présentes dans ce modèle