

ANALYSE DE STRUCTURE AVEC ISOLATION PARASISMIQUE

2.1. Définition de l'isolation parasismique, but et objectifs :

L'isolation parasismique est une technique applicable non seulement à tous les types des bâtiments mais aussi aux ponts, aux structures industrielles tels que les bacs de stockage de produits pétroliers et autres produits dangereux .Elle convient aussi à l'amélioration des capacités des résistances des structures existantes.

Bien que dans les pays l'ayant adoptée, cette technologie soit intégrée surtout dans les projets capitaux à savoir les hôpitaux, les centres de gestion des catastrophes, les musées, et les constructions urbaines.

L'isolation parasismique permet de réduire considérablement la rigidité du système structurel, en donnant à la structure avec isolation parasismique une période fondamentale meilleure que celle de la même structure sans isolateurs et aussi les forces sismiques exercées sur la structure isolée sont typiquement de l'ordre 3 à 10 fois moins que celles exercées sur la structure non isolée.

L'isolateur absorbe les déformations (inélastiques) et filtre les accélérations (hautes fréquences) de sorte que la superstructure isolée se déplace essentiellement selon un mode rigide qui subit à des faibles accélérations ce qui conduit presque à aucune déformation de la structure. Et par conséquent, les forces d'inertie transmises aux éléments des fondations sont limitées et demeurent en deçà de la capacité élastique pour tous les éléments. Ce comportement se traduit par la limitation des dommages subis par la superstructure et les éléments de fondation, ainsi que par la préservation de la fonctionnalité de la structure après le séisme.

Plusieurs études théoriques, analyses numériques et tests de laboratoire, montrent une performance excellente fournie par ces systèmes de protection soumise aux mouvements sismiques. Ainsi, il est important de noter que l'analyse dynamique de ces systèmes joue un rôle prépondérant dans l'évolution de la performance désirée par le concepteur.

Dans ce chapitre, nous présentons les bases fondamentales pour l'étude du comportement sismique des structures avec isolation parasismique à la base respectivement dans le cas linéaire et non linéaire.

2.2.Principe de l'isolation parasismique

Le fonctionnement de l'isolation parasismique est basé sur deux principes fondamentaux : La souplesse du système structural et l'augmentation de l'amortissement.

La souplesse et la flexibilité de la structure, d'où l'allongement de la période fondamentale, est obtenu par l'introduction d'un plancher entre le sol de fondation et la superstructure.

Intuitivement, on admet que la rigidité latérale de ce plancher est plus petite que la rigidité latérale de la superstructure, le système aura tendance à se déformer dans l'interface d'isolation, donc pas de déformation ou de dommage pendant la réponse sismique. Pour cela, l'isolateur est recommandé pour les structures rigides reposant sur des sols fermes.

L'augmentation de l'amortissement est essentiellement déterminée par le système d'isolation utilisé. Cette augmentation de l'amortissement sert à réduire la déformation du système d'isolation et de la superstructure, sans aucune augmentation de l'accélération de celle-ci.

La figure 2.1, montre la mise en œuvre d'un système d'isolation à la base qui privilège le comportement de la structure puisque ce système évite les effets néfastes produits dans la structure dus aux forces résultant des déplacements relatifs entre les étages.

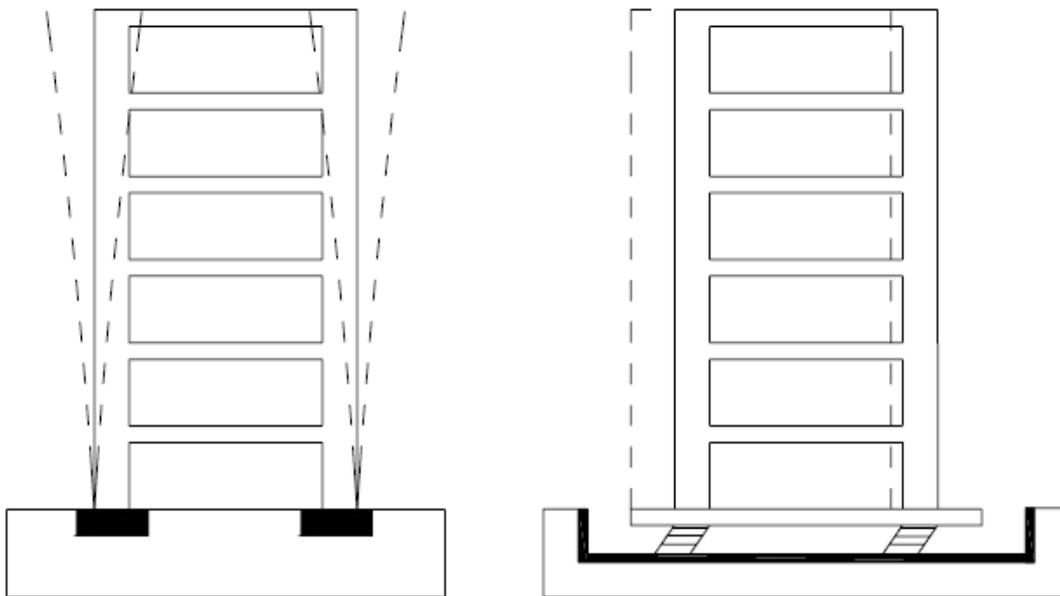


Fig. 2.1. Comportement d'une structure à base fixe et une structure avec isolation parasismique

2.3. Théorie de l'isolation parasismique à la base :

Selon les études réalisées par Molinares et Barbade (Bozzo, 1996), la théorie de l'isolation parasismique linéaire (Naeim et Kelly, 1999) peut être utilisée comme un outil efficace pour l'étude des ouvrages avec systèmes d'isolation parasismique, en particulier dans les étapes de pré dimensionnement, puisque cette étude est basée sur des hypothèses permettant de simplifier le problème. Dans le but de la validation de cette théorie linéaire, et pour se faire, par la suite, on a étudié un modèle de bâtiment avec isolateurs parasismiques à comportement linéaire et non linéaire. L'objectif de cette étude est d'obtenir une réponse du système en temps discret avec une sollicitation sismique. Dans la section suivante, nous présentons les équations de la théorie de l'isolation parasismique linéaire.

2.3.1. Mode linéaire :

La théorie linéaire est représentée par un modèle structurel à deux degrés de liberté comme le montre la figure. 2.2. Où m_s représente la masse de la superstructure du bâtiment et m_b la masse de la base de l'édifice. La raideur et l'amortissement de la structure sont représentés par k_s, c_s , et la rigidité et l'amortissement de l'isolateur par k_b, c_b (NAEIM et KELLY, 1999).

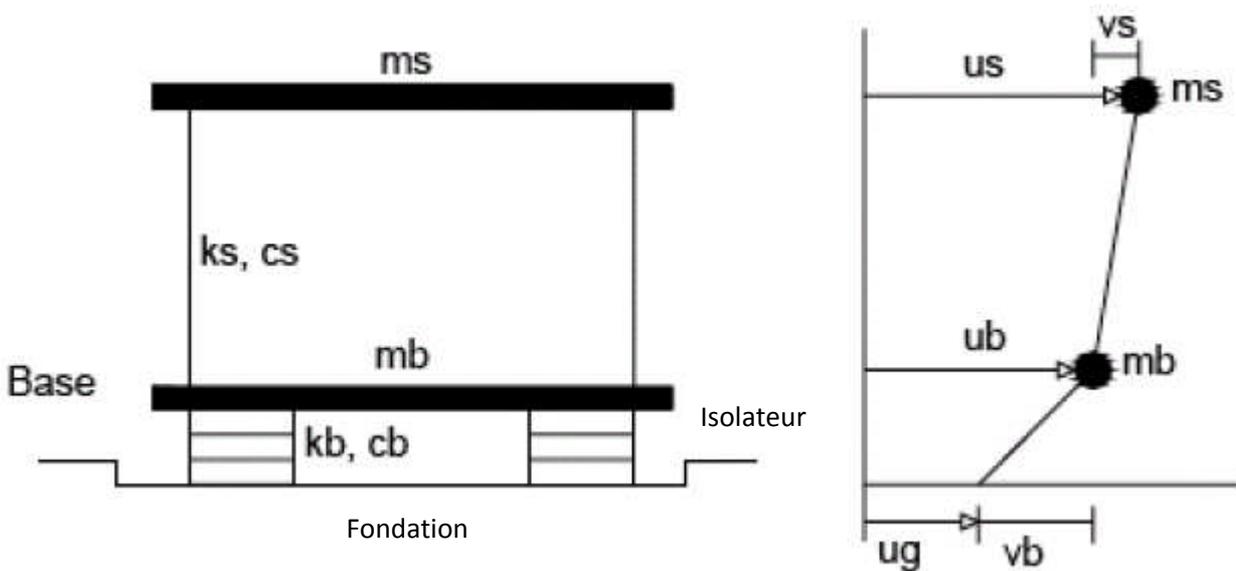


Fig. 2.2 : Schéma d'un système à 2 DDL avec isolation sismique à la base

Les déplacements absolus et relatifs des deux masses sont donnés par les expressions suivantes :

$$v_b = u_b - u_g, \quad v_s = u_s - u_g$$

u_s et u_b : sont les déplacements absolus de m_s et m_b respectivement.

v_s et v_b : sont les déplacements relatifs de m_s et m_b respectivement.

En termes de quantités, les équations fondamentales du mouvement de deux degré de liberté sont :

$$(m_s + m_b)\ddot{v}_b + m_s\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m_s + m_b)\ddot{u}_g \quad (2.1)$$

$$m_s\ddot{v}_b + m_s\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_b = -m_s\ddot{u}_g \quad (2.2)$$

Et pouvant être écrit sous la forme matricielle comme suit ^{[3] [24]}:

$$\begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (2.3)$$

Où : $M = m_s + m_b$

Aussi sous une autre forme (2.3) s'écrivant :

$$M\ddot{v} + c\dot{v} + kv = -Mr\ddot{u}_g$$

On définit un coefficient de masse γ comme suite :

$$\gamma = \frac{m_s}{m_s + m_b} = \frac{m_s}{M} \quad (2.4)$$

Dont sa valeur est toujours inférieure à 1,

Et les fréquences naturelles ω_b et ω_s sont définies comme suit :

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{m_s + m_b} \quad , \quad \omega_s^2 = \frac{k_s}{m_s} \quad (2.5)$$

5)

Supposons que : $\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2}$ ou ε varie entre 10^{-1} et 10^{-2} vu que $\omega_b \ll \omega_s$

Les facteurs d'amortissements β_b et β_s sont donnés par

$$2\beta_b\omega_b = \frac{c_b}{m_s + m_b} \quad , \quad 2\beta_s\omega_s = \frac{c_s}{m_s} \quad (2.6)$$

En termes de quantités, les équations fondamentales des mouvements Eqs.(2.1) et (2.2) deviennent :

$$\dot{w}_s + \ddot{v}_b + 2\omega_b\beta_b\dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{u}_g \quad (2.7a)$$

$$\dot{w}_s + \ddot{v}_b + 2\omega_s\beta_s\dot{v}_s + \omega_s^2 v_s = -\ddot{u}_g \quad (2.7b)$$

Les modes classiques du système combiné seront indiqués par ϕ^1 et ϕ^2 où :

$$\phi^{i'} = (\phi_b^i, \phi_s^i) \quad i = 1, 2$$

Par ailleurs, ϕ^1, ϕ^2 concernent la déformation dans la structure et le système d'isolation, les deux déplacements de la superstructure et à la base sont opposés avec des valeurs identiques.

Et l'équation caractérisant les fréquences ω_1 et ω_2 , est définie comme suit :

$$(1 - \gamma)\omega^4 - (\omega_s^2 + \omega_b^2)\omega^2 + \omega_s^2\omega_b^2 = 0 \quad (2.8)$$

Les deux solutions de cette équation sont :

$$\omega_1^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ \omega_b^2 + \omega_s^2 - \left[(\omega_b^2 - \omega_s^2)^2 + 4\gamma\omega_b^2\omega_s^2 \right]^{1/2} \right\}$$

$$\omega_2^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ \omega_b^2 + \omega_s^2 + \left[(\omega_b^2 - \omega_s^2)^2 + 4\gamma\omega_b^2\omega_s^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (2.9)$$

Et on peut présenter les deux solutions (2.9) en introduisant ε de premier ordre par^{[3][16]} :

$$\omega_1^2 = \omega_b^2(1 - \gamma\varepsilon) \quad , \quad \omega_2^2 = \frac{\omega_s^2}{(1-\gamma)}(1 + \gamma\varepsilon) \quad (2.10)$$

Et les formes de mode de déformation avec $(\phi_b^i = 1)$, $i = 1, 2$ sont définies :

$$\phi^{1T} = (\mathbf{1}, \varepsilon) \quad , \quad \phi^{2T} = \left\{ 1, -\frac{1}{\gamma} [1 - (1 - \gamma)\varepsilon] \right\} \quad (2.11)$$

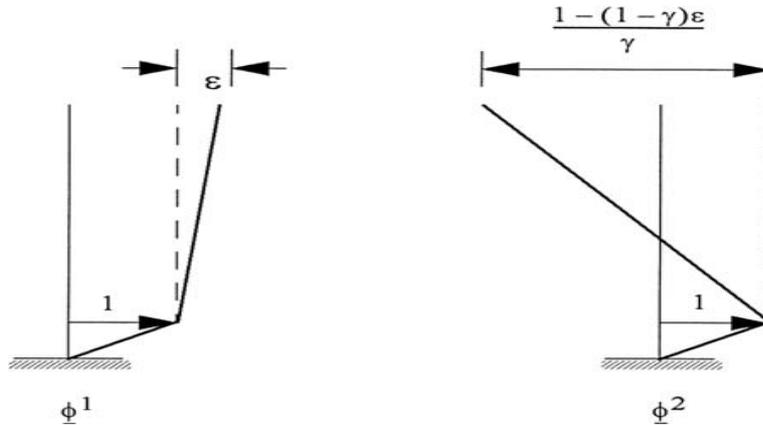


Fig. 2.3 la forme des modes propres de la structure isolée à deux degrés de liberté^[16].

Pour exprimer le déplacement initial en coordonnées modales, nous écrivons^[31]:

$$v_b = s_1 \phi_b^1 + s_2 \phi_b^2 \quad , \quad v_s = S_1 \phi_s^1 + S_2 \phi_s^2$$

S_1, S_2 sont des coefficients modaux dépendant du temps, notons que les quantités modaux M_i, L_i , sont définies par :

$$M_i = \phi^{iT} M_i \phi^i \quad , \quad M_i L_i = \phi^{iT} M_i r$$

Avec ε de premier ordre, s'écrivant :

$$M_1 = M(1 + 2\gamma\varepsilon) \quad , \quad M_2 = M \frac{(1 - \gamma)[1 - 2(1 - \gamma)\varepsilon]}{\gamma} \quad (2.12)$$

Et

$$L_1 = 1 - \gamma\varepsilon \quad , \quad L_2 = \gamma\varepsilon \quad (2.13)$$

Où L_1, L_2 sont les facteurs de participation pour les deux modes.

On note que le facteur de participation pour le deuxième mode est très petit, ce mode est presque orthogonal à l'entrée de séisme. Par conséquent, même si le séisme possède une énergie à la deuxième fréquence de mode, il ne sera pas agi sur la structure. Le système d'isolation parasismique ne fait pas l'absorption de l'énergie ; mais il guide l'énergie en fonction de sa propriété

d'orthogonalité. L'absorption d'énergie est, naturellement, une partie importante du comportement d'un système d'isolation^[4].

2.4. Représentation du comportement dynamique de l'isolation parasismique

(Modèle linéaire et Modèle non linéaire) :

Généralement, les systèmes d'isolation caractérisés par un comportement viscoélastiques linéaires ou non linéaires. Dans la pratique tous les systèmes d'isolation peuvent être modélés par les modèles non linéaires, sauf les systèmes basés élastomère sont généralement modélés par un modèles viscoélastique linéaires. Par conséquent la représentation du comportement se traduit par des boucles d'hystérésis en fonction des forces et les déplacements^[9].

2.4.1. Modèle linéaire :

L'isolation parasismique peut être représentée par un modèle linéaire équivalent caractérisé par la rigidité élastique et l'amortissement visqueux effectif. La rigidité élastique linéaire équivalente pour chaque cycle du chargement est déterminée à partir de la courbe expérimentalement obtenue en fonction des forces et les déformations de l'isolateur parasismique, et elle est présentée comme suit^[16] :

$$k_{eff} = \frac{(F^+ - F^-)}{(\Delta^+ - \Delta^-)} \quad (2.14)$$

Où F^+ et F^- sont les forces positives et négatives ainsi Δ^+ et Δ^- respectivement sont les déplacements, k_{eff} est la pente des valeurs de chargement et de déchargement de boucle d'hystérésis suivant les indications de la figure..2.4 :

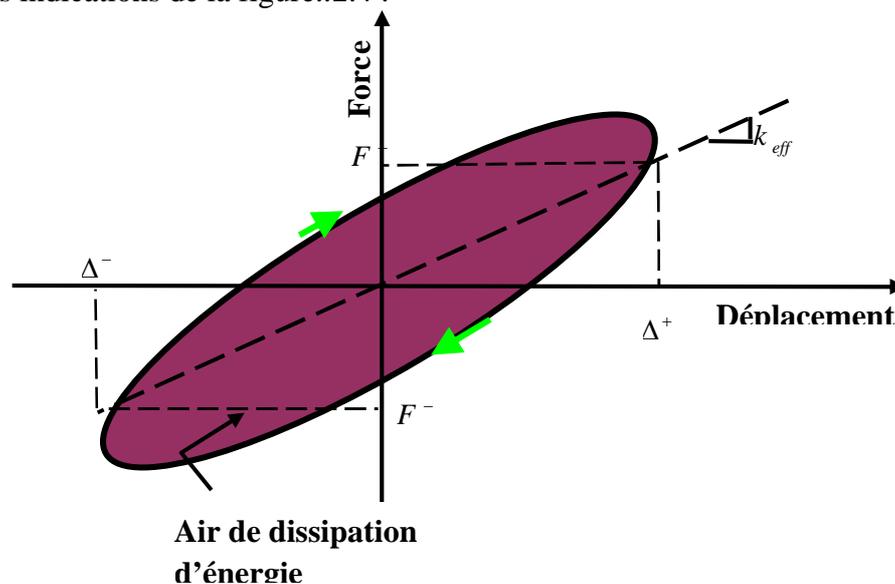


Fig. 2.4 .relation entre le déplacement et la force modèle linéaire équivalent^[17]

La constante d'amortissement visqueuse effective de l'isolation déterminée pour chaque cycle du chargement, est exprimée comme suit [16] :

$$\beta_{eff} = \frac{2E_{boucle}}{\pi k_{eff} (|\Delta^+| - |\Delta^-|)^2} \quad (2.15)$$

Où E_{boucle} est la dissipation d'énergie selon des cycles du chargement.

2.4.2. Modèle non linéaire :

Le comportement dynamique pour un modèle non linéaire peut être regardé en deux cas suivants :

2.4.2.1. Modèle bilinéaire :

Le modèle bilinéaire peut être employé pour tous les systèmes d'isolation utilisés dans la pratique. En faite, ce modèle bilinéaire représente approximativement la boucle par hystérétique non linéaire déterminé par les caractéristiques des systèmes d'appui en barreaux de plomb, d'appui en caoutchouc naturel – amortissement fort et des systèmes de pendule de glissement.

Son comportement est illustré dans la figure. I.2.5. Le modèle d'isolation est donc basée sur les trois paramètres ; (1) la rigidité d'élastique K_u , (2) la rigidité latérale K_d , (3) la force d'écoulement caractérisée par Q_d qui a une relation avec la force du barreau de plomb et le coefficient de frottement du système d'isolation de glissement [9].

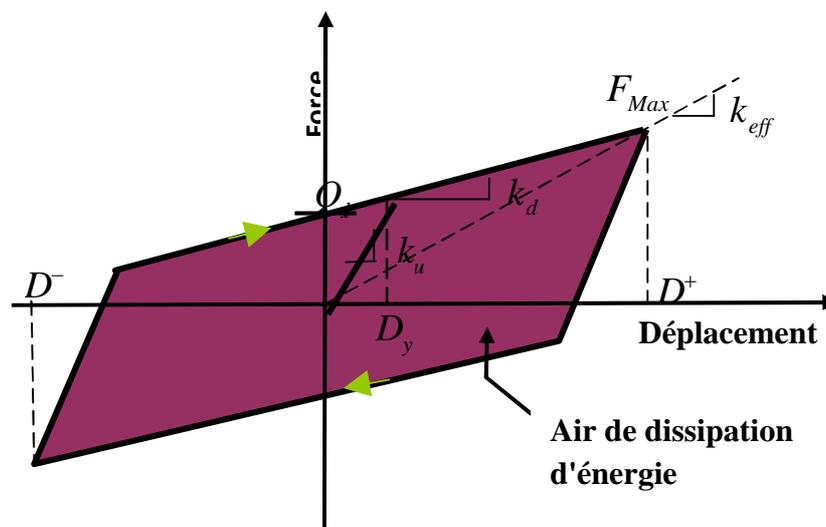


Fig..2.5 : La relation entre le déplacement et la force modèle bilinéaire équivalent.

Soit D le déplacement spécifique de modèle, la rigidité effective du système bilinéaire s'exprime comme suit ^[18] :

$$k_{eff} = k_p + \left(\frac{Q_d}{D} \right) \quad D > D_y \quad (2.16)$$

Où D_y est le déplacement maximal de poste de déformation, et il est défini comme suit :

$$D_y = \frac{Q_d}{(k_u - k_d)} \quad (2.17)$$

La possibilité de dissipation d'énergie est représentée par l'amortissement effectif β_{eff} qui est exprimé par :

$$\beta_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{(2\pi k_{eff} D^2)} \quad (2.18)$$

2.4.2.2. Modèle hystérétique :

Les systèmes d'isolation parasismique, tels que les appuis en caoutchouc avec barreau de plomb, les appuis en caoutchouc naturel – fort amortissement, et les appuis de glissement, sont caractérisés par le comportement non linéaire produit par la force et le déplacement. Pour décrire leurs caractéristiques mécaniques, le modèle de Bouc Wen est employé [Wen, 1976]

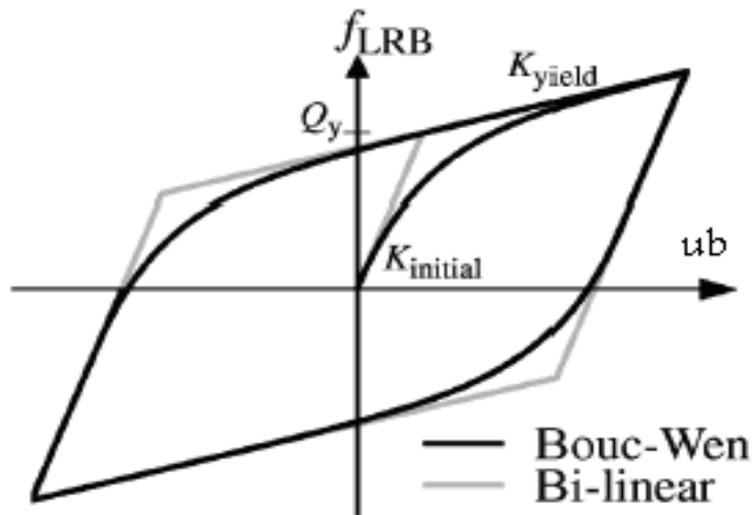


Fig..2.6 : Mode hystérésis de caoutchouc avec barreau de plomb (LRB)

La figure 2.6 montre la relation entre le modèle de bouc Wen et le modèle bilinéaire. Le modèle de Bouc Wen est modélisé par une équation mathématique qui précise le comportement par hystérétique des isolations parasismiques.

L'équation non linéaire est donnée par :

$$F(t) = \alpha \frac{F_y}{D_y} u(t) + (1 - \alpha) F_y j(t) \quad (2.19)$$

Où :

$\alpha \frac{F_y}{D_y} u(t)$: Partie linéaire équivalente

$(1 - \alpha) F_y z(t)$: La partie non linéaire

α : Rapport de poste de rigidité limite

D_y : Déplacement limite de poste déformation d'isolation parasismique

F_y : Force limite de poste déformation d'isolation parasismique

Z^* : La composante hystérésis, définit comme suit :

$$D_y Z^* = -\mu |u^*| |z| |z|^{\eta-1} - \beta u^* |z|^\eta + a u^* \quad (2.20)$$

Où :

β, μ et a : sont des constantes adimensionnelles, correspondent à la forme de la courbe d'hystérésis

η = nombre entier qui commande la légèreté du passage de l'élastique au plastique

La combinaison des paramètres non linéaires de l'équation (2.19) donne une valeur maximale de la force de reconstitution ; elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{\max} = \left[\frac{A}{\mu + \beta} \right]^{\frac{1}{\eta}} \quad (2.21)$$