

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



مخبر هندسة الزلازل و ديناميكا الهياكل  
Laboratoire Génie Sismique et Dynamique des Structures

Département Génie Civil

Laboratoire Génie Sismique et Dynamique des Structures

Mémoire en vue de

l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

---

# Performance sismique d'un pont-dalle équipé de dispositifs d'isolation parasismiques nonlinéaires

---

**Zakaria Mohamed TOUMI**

Sous la direction de

**M. B. TILIOUINE** Professeur ENP

**M. M. OUANANI** Docteur U.Djelfa

Présenté et soutenu publiquement le 16/06/2016

## Composition du Jury :

Président	M .	M.HAMMOUTENE	Professeur	ENP
Rapporteurs	M .	B.TILIOUINE	Professeur	ENP
	M .	M.OUANANI	Docteur	U.Djelfa
Examineurs	M .	M.DEMIDEM	MAA	ENP
	M .	M.TAMAHLOULT	Doctorant	U.CHLEF

**ENP (2016)**

# Remerciements

Au terme de ce travail, Nous tenons à remercier Dieu, le Tout Puissant, de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever le présent PFE.

Notre reconnaissance, va principalement à notre Directeur de mémoire, le Professeur Boualem TILIOUINE qui nous a tant aidés et instruits par son savoir, son dévouement et ses précieux conseils. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous tenons également à remercier notre Co-directeur M. Mouloud OUANANI, pour sa disponibilité et son aide fournies durant notre travail.

Nous remercions infiniment nos chers parents pour leur soutien indéfectible tout au long de notre formation et pour leurs multiples encouragements tout au long de notre vie.

Nous tenons à remercier par avance les membres du jury, qui nous font l'honneur d'évaluer notre travail.

Enfin, on tient à exprimer toute notre reconnaissance aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à faire aboutir ce travail.

# Dédicaces

*Je dédie ce travail aux deux personnes qui ont la place la plus particulière dans mon cœur...*

*Vous avez tout sacrifié pour moi n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.*

*Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier.*

*Merci Maman,... Merci Papa...*

*Mon Eternelle Reconnaissance à Ma Grand-Mère que Dieu t'accueille dans son vaste paradis, repose en paix où tu es, et Vis à jamais dans mon cœur.*

*A ma sœur source d'amour, de support, et de générosité*

*A Houda avec qui j'ai partagé beaucoup*

*Et à mon collègue Yanis pour son dévouement, sa minutie et son stress positif*

*Zakaria*

## ملخص

الخسائر المسجلة خلال الهزات الأرضية القوية، بينت درجة حساسية هياكل الجسور للزلازل و ضرورة تطوير استراتيجيات تحليلية و تصميمية لحماية أفضل لهذا الصنف من الهياكل. لتحقيق هذا الهدف يمكن تركيب عوازل زلزالية و أجهزة تخميد. يقترح هذا العمل إستراتيجيتين تصميمية مضادة للزلازل لجسر بلاطي واقع في ولاية مسيلة، الغاية منها هو التحكم في إجابة الجسر للتأثير الزلزالي. في هذا الإطار أقيمت دراسات زمنية لا خطية مبنية خاصة على نظام الـ  $FNA$  ، لغرض فحص تأثير تخميد العزل للإزاحة النسبية للبلاطة و القوى المؤثرة على مستوى الأعمدة، من ثم أجريت دراسة متغيرة العوامل حتى يتمكن لنا من إختيار العوامل المناسبة للتصميم. تقاطع النتائج يوضح أن في حالة العزل بالـ  $LRB$  ، تم تسجيل تخفيضات محسوسة في الإزاحات من جهة و زيادة القوى مدفيدف الأعمدة من جهة أخرى، أما في حالة تزويد الجسر الأصلي بأجهزة تخميد فسجل انخفاض معتبر في إزاحات و تسارعات البلاطة، قوى القص و كذا العزوم المؤثرة على قواعد الدعامات. كلمات مفتاحية : العزل الزلزالي، أجهزة مضادة الزلازل، دراسة زمنية لا خطية،  $LRB$  ، محمد لزرجير بلاطي.

## ABSTRACT

*The damage observed during strong earthquakes clearly shows how vulnerable bridge structures are and highlights the need to develop methodologies of analysis and desing in order to better protect them. This goal can be reached by installing seismic isolators and dampening devices. This paper proposes two seismic design methodologies that aim to reduce the response of a bridge to seismic activity applied to a slab bridge located in the Wilaya of M'Sila. Firstly, dynamic nonlinear time history analysis based on the FNA algorithm were carreid out in order to observe the effect of isolation dampening on the relative displacement of the deck, as well as the strains on the bases of the piers. Following that, a parametric study of the bridge fitted with Lead Rubber Bearing isolation devices was carried out in order to choose the ideal design parameters.*

*A cross check of the results shows that, in the case of LRB isolation, significant reductions on the displacment of the deck were recorded while in return, the strain on the piers bases increased. However introducing dampers to the reference model resulted in considerable reductions with regards to the displacement, deck accelerations, shear forces and moments acting on the pier bases.*

**Keywords :** Base isolation, paraseismic devices, Lead Rubber Bearing ,viscous damper, nonlinear time history analysis, slab bridge.

## Résumé

*Les dégâts importants enregistrés lors des séismes de forte intensité, ont clairement montré le degré de vulnérabilité des structures de ponts et la nécessité de développer des stratégies d'analyse et de conception, en vue de mieux protéger cette catégorie particulière de structures. Un tel objectif peut être réalisé à l'aide de l'installation d'isolateurs parasismiques et de dispositifs amortisseurs. Le présent travail, propose deux stratégies de conception parasismique dont la finalité est de réduire la réponse sismique d'un pont-dalle implanté à la Wilaya de M'sila. Dans ce cadre, des analyses dynamiques non-linéaires temporelles basées notamment sur l'algorithme FNA, ont été effectuées en vue d'examiner le comportement dynamique de la structure. Une étude paramétrique du pont équipé de dispositifs d'isolation de type " Lead Rubber Bearing" a été également effectuée afin de choisir les paramètres de conception appropriés.*

*L'examen des résultats montre que dans le cas d'isolation par des isolateurs à noyau de plomb, des réductions sensibles sur les déplacements du tablier sont enregistrées mais toutefois accompagnés d'une augmentation des efforts à la base des piles. Par ailleurs, l'introduction d'amortisseurs aux culées du modèle de référence a permis de noter des diminutions considérables sur les déplacements et les accélérations du tablier, les efforts tranchants et les moments de flexion agissant à la base des piles.*

**Mots-clés :** *Isolation sismique, dispositifs parasismiques, analyse dynamique temporelle non-linéaire, LRB, amortisseurs visqueux, pont dalle.*

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>11</b>
<b>1 Conception des Isolateurs sismiques de type LRB</b>	<b>13</b>
1.1 Conception des Isolateurs sismiques de type LRB . . . . .	13
1.2 Vérification des différents problèmes d'instabilité . . . . .	18
<b>2 Investigation numérique</b>	<b>21</b>
2.1 Introduction . . . . .	21
2.2 Présentation de l'ouvrage . . . . .	21
2.3 Modélisation du modèle 3D de référence . . . . .	23
2.4 Outils de l'analyse dynamique temporelle . . . . .	24
2.5 Les modèles d'isolation sismique . . . . .	30
2.5.1 Modèle complètement isolé par des « LRB » . . . . .	30
2.5.2 Modèle équipé d'amortisseurs externes . . . . .	39
<b>3 Etude paramétrique sur les propriétés de l'isolateur de type « LRB »</b>	<b>47</b>
3.1 Principe . . . . .	47
3.2 Résultats et interprétations . . . . .	47
<b>Conclusion</b>	<b>49</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>50</b>
<b>Annexe</b>	<b>51</b>
<b>A Accélérogrammes générés à partir du spectre réglementaire du « RPOA »</b>	<b>51</b>

# Liste des tableaux

1.1	Nuances et propriétés des élastomères . . . . .	16
2.1	Résultats de la réponse du modèle de référence . . . . .	29
2.2	Détermination des paramètres du LRB . . . . .	30
2.3	Comparaison des déplacements et des vitesses entre le modèle isolé par « LRB » et par « NRB ». . . . .	35
2.4	Comparaison de l'effort tranchant à la base de la pile entre le modèle isolé par « LRB » et par « NRB ». . . . .	36
2.5	Distorsions maximales de l'isolateur « LRB » . . . . .	37
2.6	Comparaison des efforts à la base de la pile entre les modèles avec et sans amortisseurs . . . . .	43
2.7	Comparaison des déplacements, vitesses et accélérations entre les modèles avec et sans amortisseurs . . . . .	44
3.1	Paramètres des LRB pour différents coefficients d'amortissement . . . . .	47

# Table des figures

1.1	Paramètres caractéristiques du LRB . . . . .	14
1.2	Programme Matlab pour un dimensionnement simplifié des isolateurs sismiques LRB. . . . .	15
1.3	Etapas de dimensionnement du LRB . . . . .	20
2.1	Details de la modélisation . . . . .	22
2.2	Représentation 1-D . . . . .	23
2.3	Modèle 3-D du pont de référence . . . . .	24
2.4	Accélérogramme généré à partir du spectre élastique horizontal du RPOA pour le sol 2 . . . . .	25
2.5	Fenêtre de l'analyse dynamique temporelle par intégration directe . . . . .	27
2.6	Fenêtre de l'analyse dynamique temporelle par superposition modale . . . . .	28
2.7	Modèle complètement isolé par des « LRB » . . . . .	30
2.8	Modélisation des isolateurs sismiques de type « LRB » au niveau des culées . . . . .	31
2.9	Modélisation des isolateurs sismiques de type « LRB » au niveau des piles . . . . .	32
2.10	Détail de la modélisation des isolateurs sismiques « LRB » . . . . .	33
2.11	Dimension de l'isolateur« LRB » . . . . .	34
2.12	Comparaison des déplacements en fonction du temps du modèle isolé par « NRB » et celui par « LRB » . . . . .	38
2.13	Comparaison des vitesses en fonction du temps du modèle isolé par « NRB » et celui par « LRB » . . . . .	38
2.14	Relation force-déplacement de l'isolateur « LRB » . . . . .	39
2.15	Modèle équipé d'amortisseurs externes . . . . .	39
2.16	Détails de modélisation de l'amortisseur visqueux pure . . . . .	41
2.17	Modélisation des amortisseurs visqueux pures sur SAP 2000 . . . . .	42
2.18	Comparaison des déplacements en fonction du temps entre le modèle isolé par « NRB » avec et sans amortisseurs supplémentaires. . . . .	45
2.19	Comparaison des vitesses en fonction du temps entre le modèle isolé par « NRB » avec et sans amortisseurs supplémentaires. . . . .	45
2.20	Comparaison des accélérations en fonction du temps entre le modèle isolé par « NRB » avec et sans amortisseurs supplémentaires. . . . .	46
2.21	Loi de comportement de l'amortisseur visqueux pure de type « $CV^\alpha$ » . . . . .	46
3.1	la relation force-déplacement des « LRB » de taux d'amortissement différents . . . . .	49

# Table des notations

$A_{red}$	: section réduite
$A_0$	: section efficace
$A_1$	: section effective
$A_p$	: l'aire du noyau de plomb
$A_{sf}$	: section minimale
$C_{eff}$	: coefficient d'amortissement effectif
$D_{cible}$	: déplacement cible
$D_y$	: déplacement élastique
$E_D$	: énergie dissipé par cycle
$E_c$	: module de Young équivalent
$F_d$	: force d'amortissement
$F_s$	: force de rappel
$F_y$	: limite élastique de la plaque d'acier
$K_H$	: rigidité horizontale
$K_V$	: rigidité verticale
$K_e$	: rigidité élastique
$K_{eff}$	: rigidité effective du système d'isolation
$K_p$	: rigidité plastique
$K_r$	: module élastique
$P_{DL+LL}$	: chargement total
$S_d$	: pseudo-déplacement
$S_e$	: pseudo accélération
$S_v$	: pseudo-vitesse
$T_D$	: période cible
$d_p$	: diamètre du noyau de plomb
$f_{py}$	: limite élastique du noyau de plomb
$r_N$	: vecteur force des éléments non-linéaire
$t_r$	: hauteur de l'élastomère
$t_s$	: épaisseur d'une frette d'acier
$u_g$	: déplacement horizontal du sol
$\delta_{rol-out}$	: déplacement admissible de non-glissement
$\xi_{eff}$	: taux d'amortissement effectif
$\sigma_c$	: contrainte axiale admissible

$\varepsilon_b$	: élongation au repos de l'élastomère
$\varepsilon_c$	: déformation due à l'effort axiale
$d$	: diamètre de l'isolateur
<i>HDRB</i>	: High damping rubber bearing
<i>LRB</i>	: Lead rubber bearing
<i>NRB</i>	: Naturel rubber bearing
$A$	: l'aire totale de l'élastomère
<i>Acc</i>	: accélérogramme
$B$	: largeur de l'élastomère
<i>C.I</i>	: complètement isolé
<i>C.I + CV<math>\alpha</math></i>	: complètement isolé équipé d'amortisseurs externes
$C$	: matrice d'amortissement
$D_c$	: découplage
$E$	: module de Young
$E_c$	: module de Young équivalent
$G$	: module de cisaillement
$K$	: matrice de rigidité élastique
$L$	: longueur de l'élastomère
$M$	: matrice masse diagonale
$N$	: nombre de couche d'élastomère
$Q$	: résistance caractéristique
$S$	: coefficient de forme
$g$	: accélération de la pesanteur
$k$	: coefficient modificateur
$m$	: masse qui revient à l'isolateur
$r$	: vecteur force appliqué
$t, t_i, t_{i+1}$	: temps, incrément
$t$	: épaisseur d'une couche d'élastomère
$\alpha, \beta$	: coefficients de Newmark
$\gamma_{max}$	: distorsion maximale
$\xi$	: taux d'amortissement

# Introduction

Les Dommages très sévères constatés après les tremblements de terre de Norridge (Californie, 1994) et de Kobé (Japon, 1995) et la mise hors service de plusieurs structures et ce malgré les ajustements considérables apportés dans les normes de conception de ces ouvrages dans les années 1980, ont poussé l'incorporation des technologies innovatrices pour la première fois en Amérique du Nord dans le domaine de la construction parasismique.

L'isolation sismique à la base consiste à découpler le mouvement du sol du mouvement de la structure dans le but de réduire les forces transmises à cette dernière. En outre, en raison de la vulnérabilité sismique de notre pays, le développement et l'intégration des concepts de ces nouvelles technologies deviennent une nécessité pour la protection des ponts qui représentent des maillons indispensables pour les liaisons entre les différentes régions.

L'approche conventionnelle dans la conception parasismique est basée sur la combinaison de la résistance avec la ductilité pour pallier aux sollicitations sismiques, c'est pour cela que l'ingénieur devra s'appuyer sur la ductilité fournie par les matériaux afin d'éviter les catastrophes et garantir la stabilité de la structure devant de graves séismes, cependant cette méthode possède l'inconvénient de provoquer des déformations plastiques irréversibles à frais de réparation non négligeables à cause du niveau élevé de l'énergie générée durant un mouvement sismique. L'autre approche consiste à utiliser des technologies parasismiques comme l'élastomère fretté ou tout autre système se caractérisant par une raideur  $k$ , avec l'incorporation ou pas des dispositifs de dissipation d'énergie qui ont pour objectif principal l'absorption d'une partie importante de l'énergie sismique et la diminution autant que possible, des dégâts dans les éléments structuraux.

Dans la présente étude, on propose d'étudier la réponse dynamique temporelle de deux modèles d'isolation pour un pont dalle situé à Msila.

# Chapitre 1

## Conception des Isolateurs sismiques de type LRB

### 1.1 Conception des Isolateurs sismiques de type LRB

La conception de l'isolateur LRB est basée selon (Naeim et Kelly, 1999) sur l'utilisation de la rigidité post élastique et de l'amortissement hystérétique du noyau de plomb. Ce comportement peut être idéalisé par une relation bilinéaire de type force-déplacement et caractérisé par les paramètres suivants :

- Une rigidité élastique  $K_e$  très importante due à la présence du noyau en plomb qui est approximativement égale à 10 fois la rigidité post élastique  $K_p$ . [1]

$$\frac{K_e}{K_p} = 10 \quad (1.1)$$

- La rigidité effective :

$$K_{eff} = \frac{(4m\pi^2)}{T_D^2} \quad (1.2)$$

Avec :

$m$  : La masse qui revient sur l'isolateur.

$T_D$  : la période cible d'isolation.

- Le déplacement cible  $D_{cible}$  déduit du spectre de réponse élastique à la période d'isolation équivalente :

$$D_{cible} = \frac{S_a T_D^2}{4\pi^2} \quad (1.3)$$

Où :  $S_a$  : Pseudo-accélération déduite du spectre de réponse élastique.

- L'énergie de dissipation par cycle

$$E_D = 2\pi K_{eff} D_{cible}^2 \xi_{eff} \quad (1.4)$$

Avec :

$\xi_{eff}$  : Amortissement effectif du dispositif.

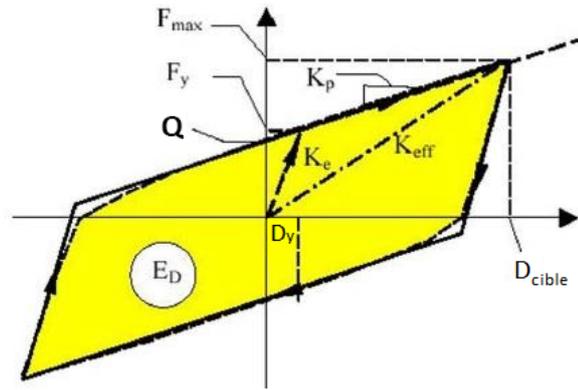


FIGURE 1.1 – Paramètres caractéristiques du LRB

La détermination des paramètres du « Lead Rubber Bearing » cités ci-dessus peut se faire selon l'algorithme proposé par Naeim et Kelly, en suivant les étapes suivantes :

1. Le déplacement élastique  $D_y$  correspondant à la force d'écoulement  $F_y$  est supposé nul dans un premier temps.
2. La résistance caractéristique  $Q$  est calculée par la relation suivante :

$$Q = \frac{E_D}{4(D_{cible} - D_y)} \quad (1.5)$$

3. L'approximation de  $Q$  est utilisée par la suite pour calculer la rigidité post-élastique  $K_p$  :

$$K_p = K_{eff} - \frac{Q}{D_{cible}} \quad (1.6)$$

4. La rigidité élastique est déduite du rapport

$$\frac{K_e}{K_p} = 10$$

5. Le déplacement élastique  $D_y$  est recalculé jusqu'à sa convergence :

$$D_y = \frac{Q}{K_e - K_p} \quad (1.7)$$

Un programme a été développé sous Matlab en vue d'établir un dimensionnement simplifié des isolateurs sismiques de type LRB selon la méthode exposée ci-dessus.

Les données à introduire sont :

- La période cible d'isolation  $T_D(s)$
- La pseudo-accélération du spectre de réponse élastique  $S_a$  selon la zone sismique, l'importance du pont et la catégorie du sol.
- La masse «  $m$  » qui revient à l'isolateur en tonnes ( $t$ )
- Le taux d'amortissement  $\xi$  de l'isolateur sismique.

Les paramètres de sortie sont :

- La rigidité effective  $K_{eff}$
- Le déplacement cible  $D_{cible}$
- La résistance caractéristique  $Q$
- La rigidité post élastique  $K_p$
- La rigidité élastique  $K_e$
- Le déplacement élastique  $D_y$

```

td=input('donner td')
Sa=input('donner Sa')
xi=input('donner xi')
m=input('donner la masse')
keff=4*m*pi^2/td^2
D=Sa*td^2/(4*pi^2)
wd=2*pi*D^2*keff*xi;
Dy=0;
for i=1:20
    Q=wd/(4*(D-Dy))
    Kp=keff-Q/D
    Ke=10*Kp
    Dy=Q/(K1-Kp)
end
    
```

FIGURE 1.2 – Programme Matlab pour un dimensionnement simplifié des isolateurs sismiques LRB.

L’isolateur sismique a pour fonction de découpler la structure considérée, toutefois il doit être judicieusement dimensionné afin de résister aux charges statiques et dynamiques auxquelles il sera soumis durant sa durée de vie.

Pour cela, nous exposerons dans ce qui suit une méthode de dimensionnement proposée par « Jong-Dar Yau » qui a pour but de conférer aux isolateurs sismiques de type « Lead Rubber bearing » un dimensionnement adéquat, apte à résister aux différents chargements. Pour commencer, les propriétés des matériaux, à savoir le module de Young  $E$ , le module cisaillement  $G$  et le facteur de modification  $k$  doivent être sélectionnés de la table 1.1 ci-dessous.[2]

TABLE 1.1 – Nuances et propriétés des élastomères

Rubber Hardness IRHD $\pm 2$	Young’s Modulus $E$ ( $N/cm^2$ )	Shear Modulus $G$ ( $N/cm^2$ )	Modified Factor $k$
30	92	30	0.93
35	118	37	0.89
40	150	45	0.85
45	180	54	0.8
50	220	64	0.73
55	325	81	0.64
60	445	106	0.57
65	585	137	0.54
70	735	173	0.53
75	940	222	0.52

La hauteur totale des couches d'élastomère ( $t_r$ ) est défini par le rapport entre le déplacement cible  $D_{cible}$  et la distorsion maximale  $\gamma_{max}$  de l'isolateur.

$$t_r = \frac{D_{cible}}{\gamma_{max}} \quad (1.8)$$

L'aire du noyau de plomb ( $A_p$ ) est déterminée par le rapport suivant :

$$A_p = \frac{Q}{f_{py}} \quad (1.9)$$

Où :

$f_{py}$  : la limite élastique du noyau de plomb est égale à  $10MN/m^2$

Pour déterminer l'aire totale des élastomères ( $A$ ) et l'épaisseur  $t$  d'une seule couche

1. Calculer le facteur de forme  $S$  de l'équation suivante :

$$\frac{K_v}{K_h} = \frac{\frac{E_c A}{t_r}}{\frac{GA}{t_r}} = \frac{E_c}{G} = \frac{E(1 + 2kS^2)}{G} \geq 400 \quad (1.10)$$

Où

$E_c$  : le module de Young équivalent de l'association entre frettes d'acier et élastomère

$K_v$  : La rigidité verticale de l'isolateur

$K_h$  : La rigidité horizontale de l'isolateur

2. Calculer la section efficace  $A_0$  de l'isolateur, en se basant sur la contrainte axiale admissible  $\sigma_c$  et cela sous le cas d'un chargement vertical  $P_{(DL+LL)}$

$$\sigma_c = \frac{P_{DL+LL}}{A_0} \leq 80Kgf/cm^2 = 7.84MN/m^2 \quad (1.11)$$

$P_{(DL+LL)}$  : Est la charge totale en KN qui revient à l'isolateur

3. Déterminer la section effective  $A_1$  de l'isolateur, à partir des déformations de cisaillement induites par les charges verticales :

$$\gamma_c \Big|_{DL+LL} = 6S \frac{P_{DL+LL}}{E_c \times A_1} \leq \frac{\varepsilon_b}{3} \quad (1.12)$$

Où :  $\varepsilon_b$  : représente l'élongation de l'élastomère au repos sélectionnée selon le guide de spécification « American Association of State Highway and Transportation officials [1983] »

$S$  : le coefficient de forme

4. Déterminer la section minimale  $A_{sf}$  à la rupture de l'isolateur par effort de cisaillement

$$A_{sf} = \frac{K_e t_r}{G} \quad (1.13)$$

Avec  $K_r$  qui représente le module élastique de l'isolateur

$$K_p = K_r \left( 1 + 12 \frac{A_p}{A_0} \right) \quad (1.14)$$

Et  $K_p$  qui est la rigidité post élastique du LRB dans la direction horizontale :

$$K_p = K_{eff} - \frac{Q}{D_{cible}}$$

$A_{sf}$  est utilisée pour déterminer les dimensions de l'isolateur, pour en déduire à travers les relations suivantes la section réduite  $A_{re}$  qui représentera par la suite la section effective  $A_2$  :

$$A_{re} = L(B - D_{cible}) \text{ pour les appareils rectangulaires}$$

$$A_{re} = \frac{d^2}{4}(\beta - \sin\beta) \text{ Pour les appareils circulaires}$$

$$\beta = 2\cos^{-1}\left(\frac{D_{cible}}{d}\right)$$

Avec :

$D_{cible}$  : le déplacement cible horizontal

$B, L$  : dimensions en plan de l'isolateur rectangulaire avec ( $B \leq L$ )

$d$  : diamètre de l'isolateur circulaire

5. La section de l'isolateur ( $A$ ) est alors le maximum des 3 sections  $A_0, A_1$  et  $A_2$  calculées précédemment

$$A = \max(A_0, A_1, A_2)$$

6. Choisir l'épaisseur ( $t$ ) des couches d'élastomère à partir du coefficient de forme  $S$  :

$$S = \frac{LB}{2 \times (L+B)t} \text{ pour un appareil rectangulaire}$$

$$S = \frac{d}{4t} \text{ pour un appareil circulaire}$$

Où :

$t$  : épaisseur d'une couche d'élastomère

7. utiliser  $t_r = N \times t$  pour déterminer le nombre de couches d'élastomère  $N$   
 8. Epaisseur des frettes en acier  $t_s$

$$t_s = \frac{2(t_i + t_{i+1})P_{DL+LL}}{A_{re}F_s} \geq 2mm \quad (1.15)$$

Avec :

$t_i, t_{i+1}$  : représentent l'épaisseur de l'élastomère au niveau supérieur et inférieur de la

plaque d'acier

$$F_s : 0.6F_y$$

$F_y$  : Limite élastique de la plaque d'acier ( $= 247.7MN/m^2$ )

$A_{red}$  : La surface réduite de l'isolateur sous un déplacement horizontal

## 1.2 Vérification des différents problèmes d'instabilité

Après avoir déterminé les dimensions en plan et la hauteur de notre isolateur, il est important de vérifier la stabilité de notre appareil vis-à-vis des différents problèmes d'instabilité :

1. la condition de la contrainte au cisaillement suivante doit être satisfaite :

$$\gamma_{c,DL+LL} = 6S\varepsilon_c = 6S \frac{P_{DL+LL}}{E_c A} \leq \frac{\varepsilon_b}{3} \quad (1.16)$$

Où tous les paramètres ont été définis précédemment dans l'Equation (1.12)

2. Condition de stabilité au flambement : pour éviter que l'appareil d'appui ne devienne instable, la contrainte de compression moyenne  $\sigma_c$  de l'appareil d'appui doit satisfaire la condition suivante :

$$\sigma_c = \frac{P}{A} < \sigma_{cr} = \frac{GSL}{2.5t_r} \quad (1.17)$$

Où  $L$  est la valeur de la dimension de l'appareil dans le cas d'une section rectangulaire (on prendra le diamètre  $d$  dans le cas d'une section circulaire)

3. Capacité de diffusion de l'énergie : le corps en Plomb doit être dimensionné convenablement afin de lui permettre une bonne dissipation d'énergie, pour cela ses dimensions doivent satisfaire la condition suivante :

$$1.25 \leq \frac{H}{d} \leq 5.0 \quad (1.18)$$

Où

$H$  = La hauteur du dispositif

$d$  = diamètre du noyau de plomb

4. Condition de non-glissement : le déplacement  $D$  de l'appareil d'appui sous le chargement d'un tremblement de terre doit satisfaire la condition suivante :

$$D \leq \delta_{(roll-out)} = \left( \frac{P_{DL+LL} \times L}{P_{DL+LL} + K_p \times h} \right) \quad (1.19)$$

Où  $K_p$  représente la rigidité plastique de l'appareil d'appui dans la direction horizontale

L'organigramme qui résume les étapes de dimensionnement est élaboré ci-après :

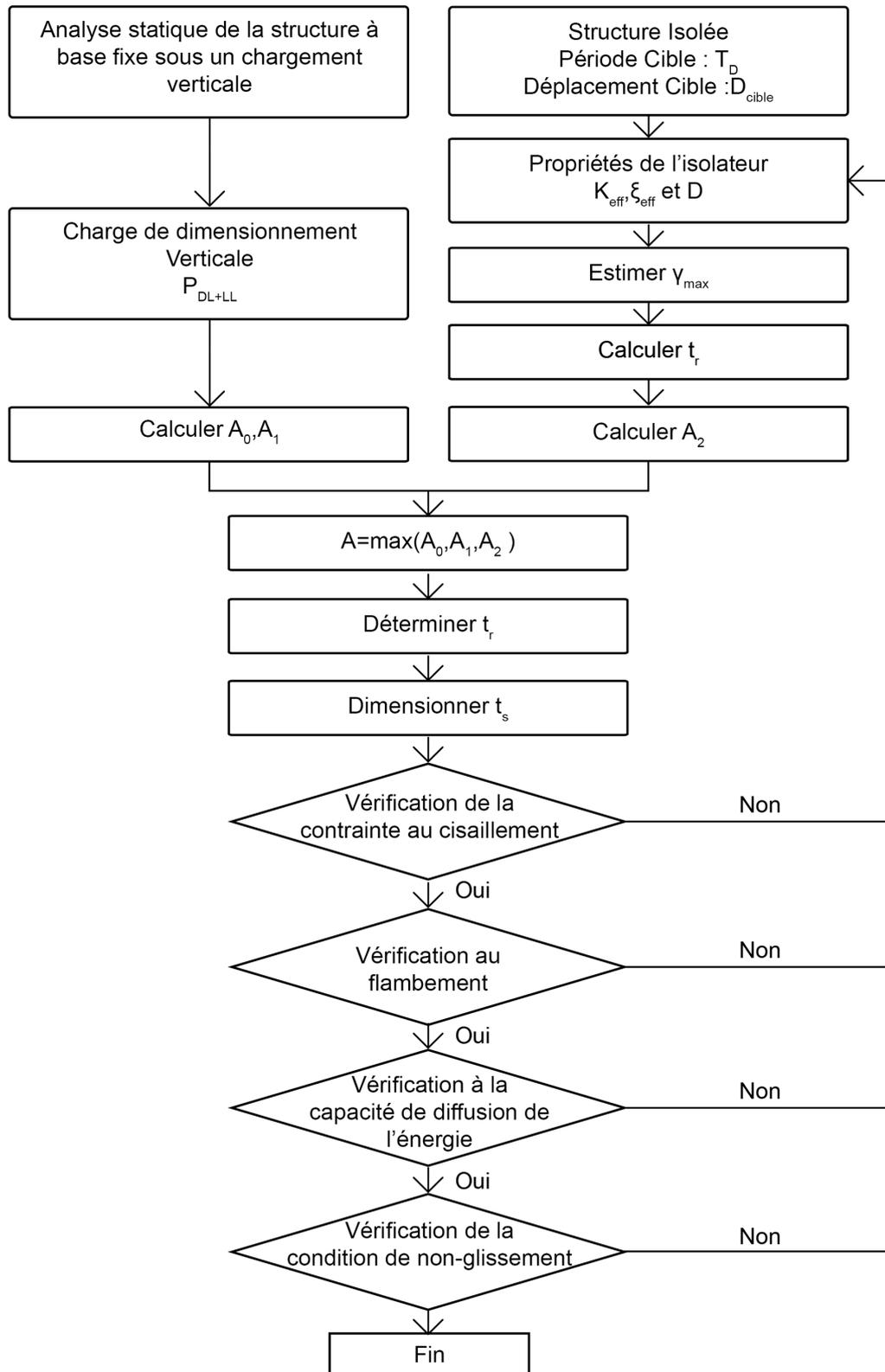


FIGURE 1.3 – Etapes de dimensionnement du LRB

# Chapitre 2

## Investigation numérique

### 2.1 Introduction

Dans cette partie, une application sur un pont dalle sera traitée selon le règlement algérien « RPOA ». L'analyse dynamique sera établie sur deux modèles par la méthode de superposition modale (FNA). L'excitation dynamique introduite sous forme d'accélérogrammes artificiels, est générée à partir du spectre de réponse élastique correspondant aux données sismiques et géologiques du pont.

Le premier modèle sera totalement isolé par la mise en place d'isolateurs sismiques de type « LRB » au niveau des piles et des culées, le deuxième quant à lui sera équipé d'amortisseurs externes visqueux purs de type  $CV^\alpha$ .

### 2.2 Présentation de l'ouvrage

L'exemple que nous allons traiter, considère un type de pont assez répandu. Il s'agit d'un pont dalle comportant 3 travées égales de 25m, reposant sur deux piles de section ( $1.5 \times 6$ ), de 8m de hauteur.

Le tablier repose sur 16 appareils d'appui en élastomère fretté « NRB », de ( $800 \times 800 \times 150$ ) mm dotés d'un module de cisaillement de 1.2 MPA (4 sur chaque pile et chaque culée).

Le pont est implanté à M'sila : zone sismique II.a, catégorie d'importance 1, sol de catégorie (S2).

La figure 2.1 résume les principales caractéristiques du pont.

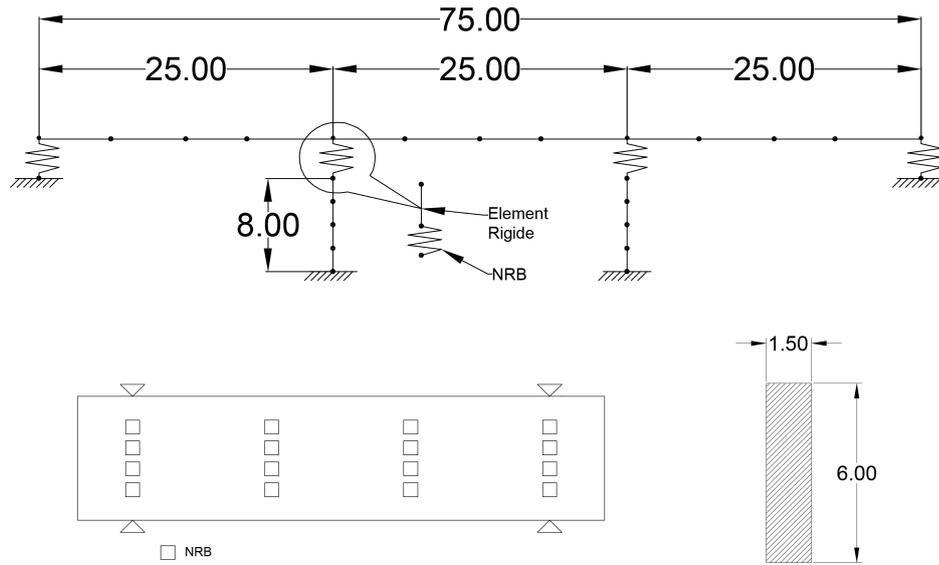


FIGURE 2.1 – Détails de la modélisation

-Béton :

$$f_{ck} = 35MPa \quad \rho = 2.5t.m^{-3} \quad E = 33GPa$$

-Masse du tablier :

$$M_{tablier} = 3936tonnes$$

-La rigidité du système d'appui : Les appuis sont supposés des éléments plaques, la rigidité est sous la forme suivante :

$$K_{pile} = \frac{3EI}{L^3} \times \frac{1}{(1 + \phi)}$$

avec :

$$-\phi = \frac{3EI}{L^2 KGA}$$

- I : Inertie de la section de la pile

- L : Hauteur de la pile

$$K_{neoprenne} = 5120KN/m$$

$$K_{appui} = \frac{1}{\frac{1}{K_{pile}} + \frac{e}{4 \times a \times b \times G}}$$

$$K_{systeme} = \frac{2}{\frac{1}{K_{pile}} + \frac{e}{4 \times a \times b \times G}} + 8 \times 5120$$

$$K_{systeme} = 79501 \text{KN.m}^{-1}$$

$$\Rightarrow T = 2.\pi.\sqrt{\frac{M_{vibrante}}{K_{systeme}}}$$

$$\Rightarrow T = 1,39s$$

La même période fondamentale est obtenue par le modèle 1D :

Mode 1 - T = 1,39796; f = 0,71533



FIGURE 2.2 – Représentation 1-D

## 2.3 Modélisation du modèle 3D de référence

En vue d'illustrer le comportement sismique 3-D, un modèle tridimensionnel du pont de référence a été développé à l'aide du logiciel de calcul « SAP 2000 ». La figure suivante illustre le modèle 3D :

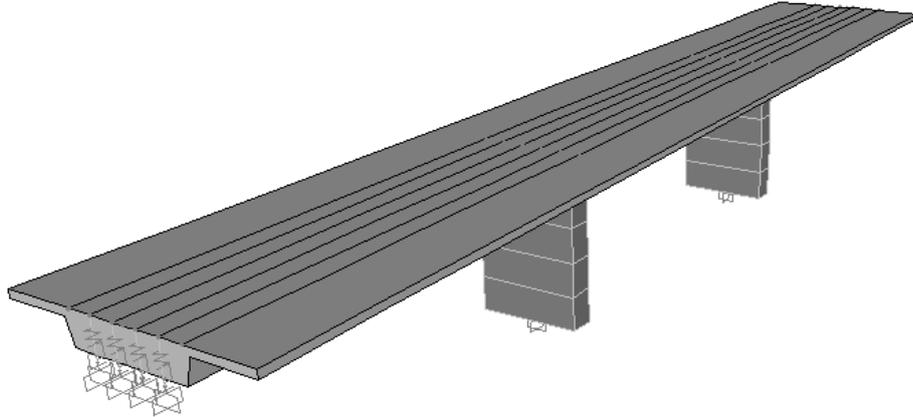


FIGURE 2.3 – Modèle 3-D du pont de référence

L'analyse modale du modèle de référence a permis d'obtenir une période fondamentale de 1,40 secondes dans le sens longitudinal.

## 2.4 Outils de l'analyse dynamique temporelle

L'analyse dynamique temporelle a été conduite par l'introduction d'accélérogrammes artificiels générés à partir du spectre de réponse élastique correspondant aux données sismiques et géologiques du pont.

L'étude a été menée en considérant un échantillon de 20 accélérogrammes, chaque accélérogramme est appliqué dans le sens longitudinal à 100%, alors que dans le sens latéral, il sera appliqué à hauteur de 30%. Ces pourcentages sont recommandés par les différents règlements dans le cas de l'analyse par accélérogramme artificiel. Si on avait considéré un séisme réel donné par ses 2 composantes Nord-sud et Est-Ouest, nous aurions pris ces deux composantes sans prendre en compte aucun pourcentage vu qu'il s'agit d'enregistrement réel.

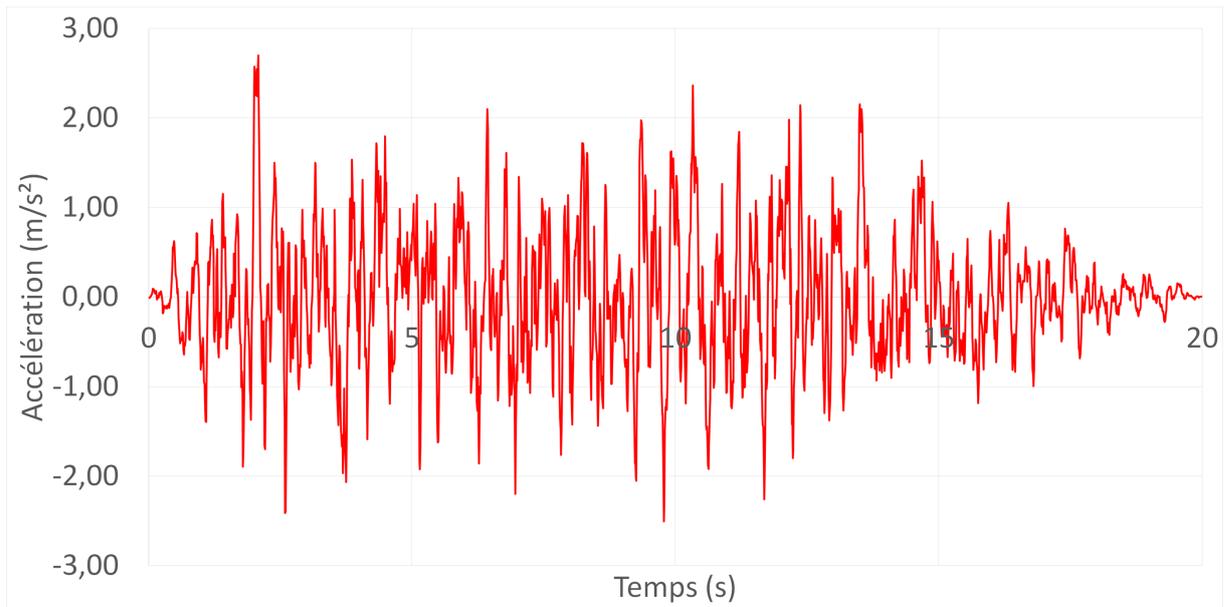


FIGURE 2.4 – Accélérogramme généré à partir du spectre élastique horizontal du RPOA pour le sol 2

En présence d'un comportement non-linéaire provenant dans notre cas des isolateurs sismiques et des amortisseurs, l'analyse doit se faire par l'une des méthodes suivantes qui confèrent des résultats exacts.

1. Analyse dynamique temporelle non-linéaire par intégration pas-à-pas sous SAP 2000  
« Méthode de Newmark » :

La méthode de Newmark consiste en une intégration pas-à-pas à travers une discrétisation de l'intervalle d'excitation en une suite de courts incréments de temps  $\Delta t$ .

Le logiciel « SAP 2000 » nous propose 5 types de schémas d'intégration :

- La méthode de Newmark,
- La méthode de Wilson,
- La méthode de collocation,
- La méthode de Hiber – Hughes-Taylor,
- La méthode de Chung and Hulbert.

Chacune de ces méthodes se caractérise par des paramètres permettant de maîtriser la convergence de la méthode, il convient de les choisir soigneusement de telle sorte à assurer la convergence de la méthode et d'atteindre le résultat final.

En ce qui concerne la méthode de Newmark, les coefficients  $\gamma$  et  $\beta$  sont respectivement égaux à 0.5 et 0.25 afin d'assurer une convergence inconditionnellement stable.

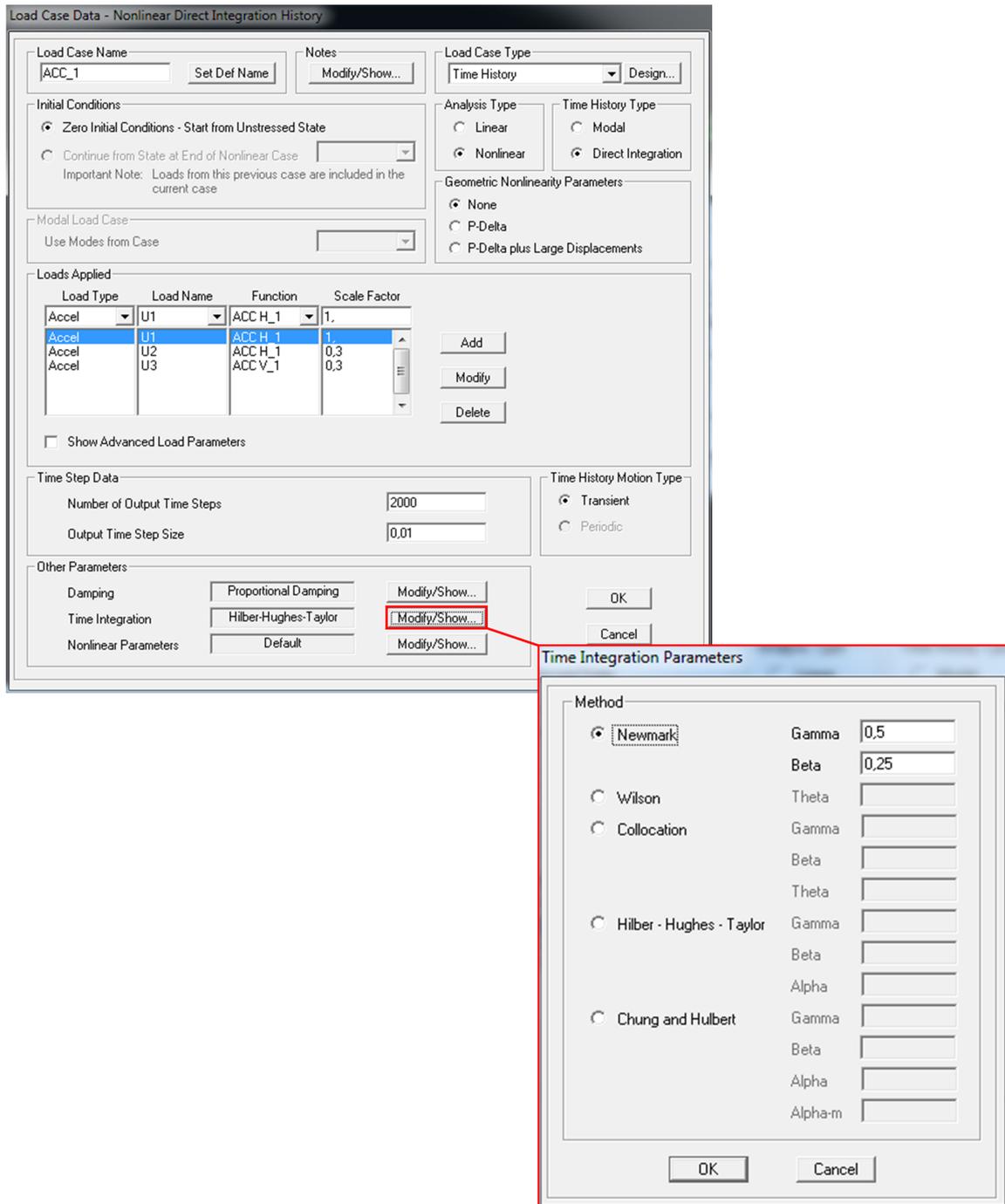


FIGURE 2.5 – Fenêtre de l’analyse dynamique temporelle par intégration directe

## 2. Analyse dynamique temporelle non-linéaire par superposition modale (FNA) sous SAP 2000

La méthode du « Fast Non linear Analyses » est une approche extrêmement efficace pour déterminer la réponse de la structure vis-à-vis d'une excitation sismique introduite sous forme d'accélérogramme. Elle est utilisée lorsque les non linéarités sont concentrées comme dans notre cas au niveau des isolateurs sismiques et des amortisseurs. Elle procure des résultats d'une manière beaucoup plus rapide que la méthode d'intégration pas-à-pas.

A titre de comparaison, une analyse par superposition modale de notre structure par l'application d'un accélérogramme dans les trois sens, prend 7 secondes, alors que la même procédure effectuée par la méthode de Newmark dure environs 4 minutes et 33 secondes.

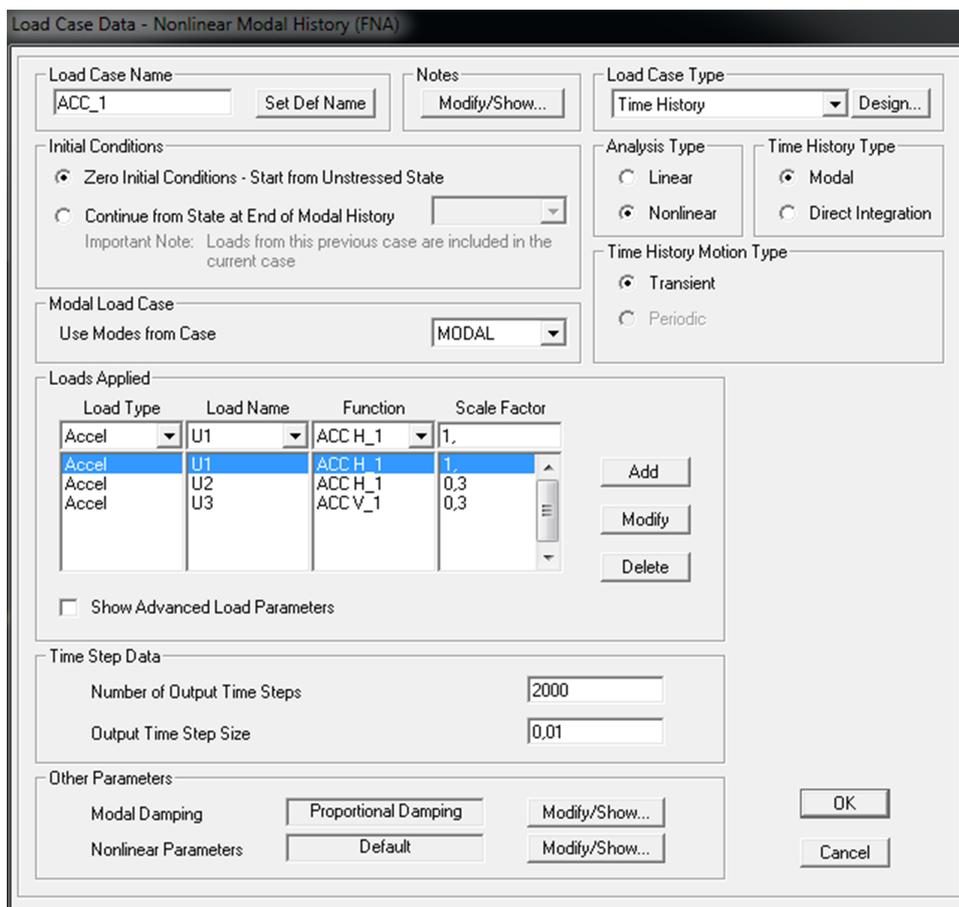


FIGURE 2.6 – Fenêtre de l'analyse dynamique temporelle par superposition modale

Vu la rapidité d'exécution et l'exactitude des résultats proposés par la méthode de superposition modale « FNA », on retiendra cette dernière pour l'élaboration de nos prochains résultats.

L'Analyse du modèle de référence sous l'effet de 20 accélérogrammes donne les déplacements, l'effort tranchant dans le sens longitudinal ( $V_x$ ) et transversal ( $V_y$ ) à la base d'une pile. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 2.1 – Résultats de la réponse du modèle de référence

Accélérogramme	Déplacement ( cm )	$V_x$ (KN)	$V_y$ (KN)
01	9.81	2022.34	204.31
02	10.28	1992.31	187.99
03	10.10	1933.79	199.66
04	10.03	2036.32	198.78
05	9.61	1874.28	202.91
06	10.58	2078.23	208.90
07	10.12	1970.85	185.54
08	10.66	2137.39	209.56
09	8.04	1705.36	194.75
10	9.96	1953.26	178.74
11	9.87	1875.01	207.51
12	9.82	2010.98	200.64
13	8.96	1998.41	199.51
14	10.39	2035.61	211.96
15	9.28	1732.31	207.69
16	8.96	1851.97	199.97
17	10.63	2169.29	204.31
18	9.40	1848.29	199.75
19	10.48	1897.98	213.65
20	10.37	2026.37	210.66
<b>Moyenne</b>	<b>9.92</b>	<b>1957.52</b>	<b>201.34</b>

Nous remarquons du tableau ci-dessus, des déplacements élevés du tablier, pour cela nous proposons dans ce qui suit plusieurs conceptions afin de faire face au problème de ces mêmes déplacements.

## 2.5 Les modèles d'isolation sismique

### 2.5.1 Modèle complètement isolé par des « LRB »

Dans le but de réduire les déplacements engendrés par les sollicitations sismiques, nous proposons un premier modèle complètement isolé et cela en plaçant des isolateurs sismiques de type « LRB » au niveau des piles et des culées (figure 2.7).

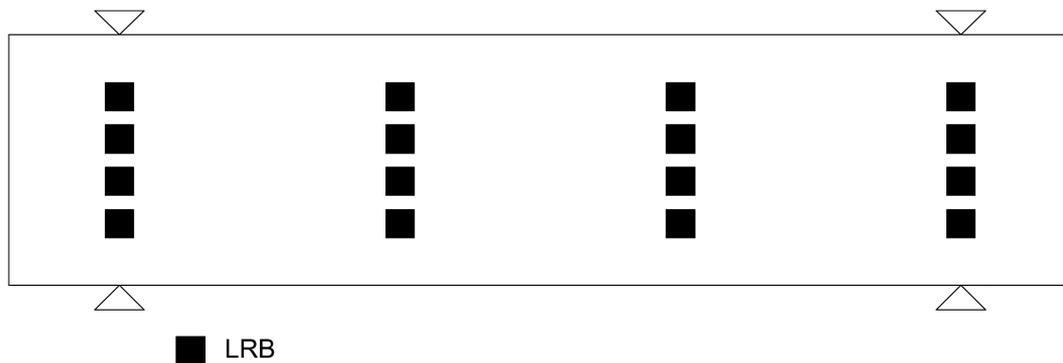


FIGURE 2.7 – Modèle complètement isolé par des « LRB »

On commence tout d'abord par déterminer les paramètres des dispositifs d'isolation en appliquant le programme Matlab présenté précédemment [figure 1.2]. Le dimensionnement des LRB se fera pour la même période d'isolation obtenue à travers le modèle isolé par « NRB », et cela afin d'effectuer une comparaison entre les deux modèles.

TABLE 2.2 – Détermination des paramètres du LRB

Paramètres d'entrée	Paramètres de sortie
	$K_{eff} = 12815KN$
$T_D = 1.40s$	$D_{cible} = 4.21cm$
$S_a = 0.84$	$Q = 355,39KN$
$\xi = 33\%$	$K_p = 4371.8$
$m = 636,21$ tonnes	$K_e = 43718KN$
	$D_y = 0.9cm$

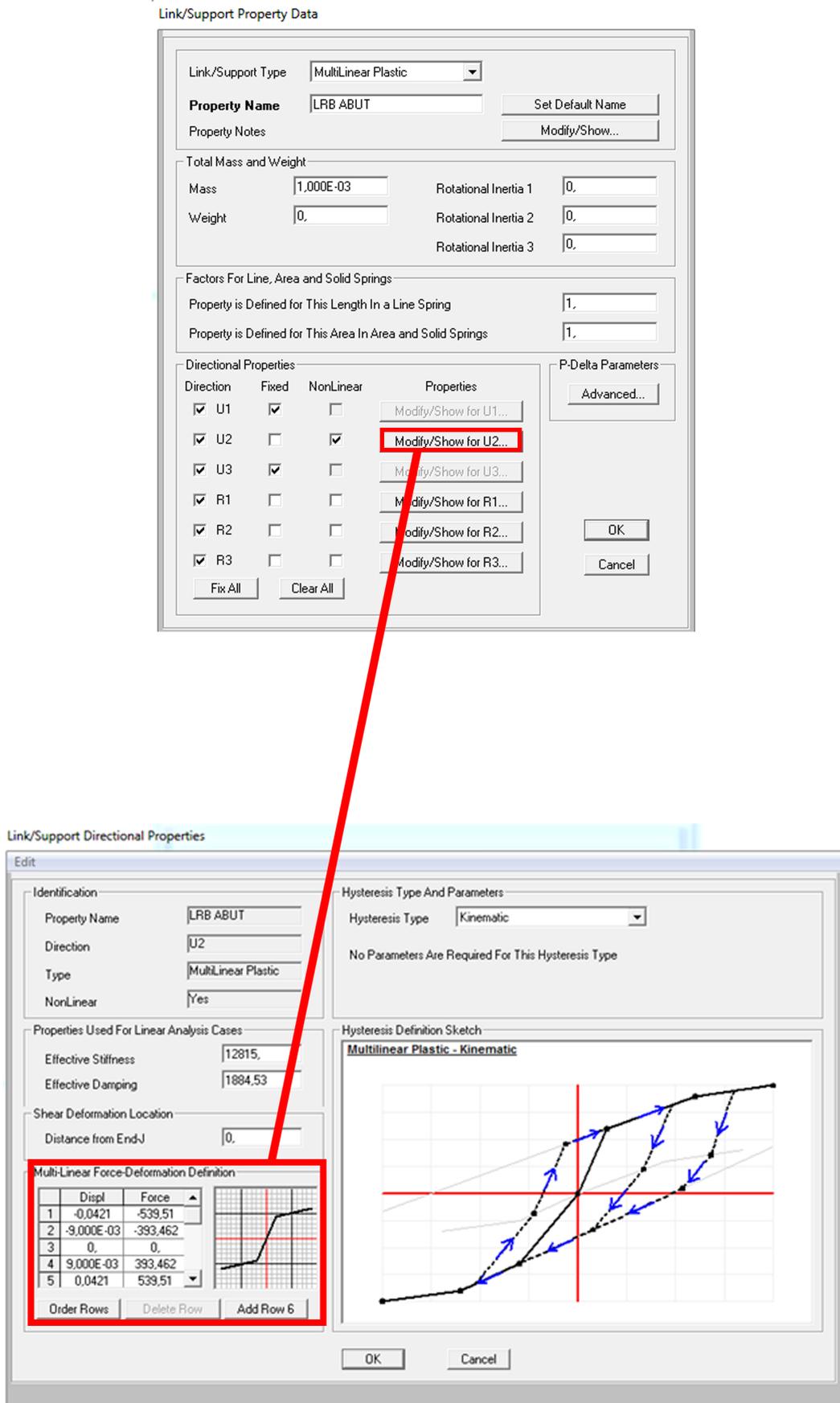


FIGURE 2.8 – Modélisation des isolateurs sismiques de type « LRB » au niveau des culées

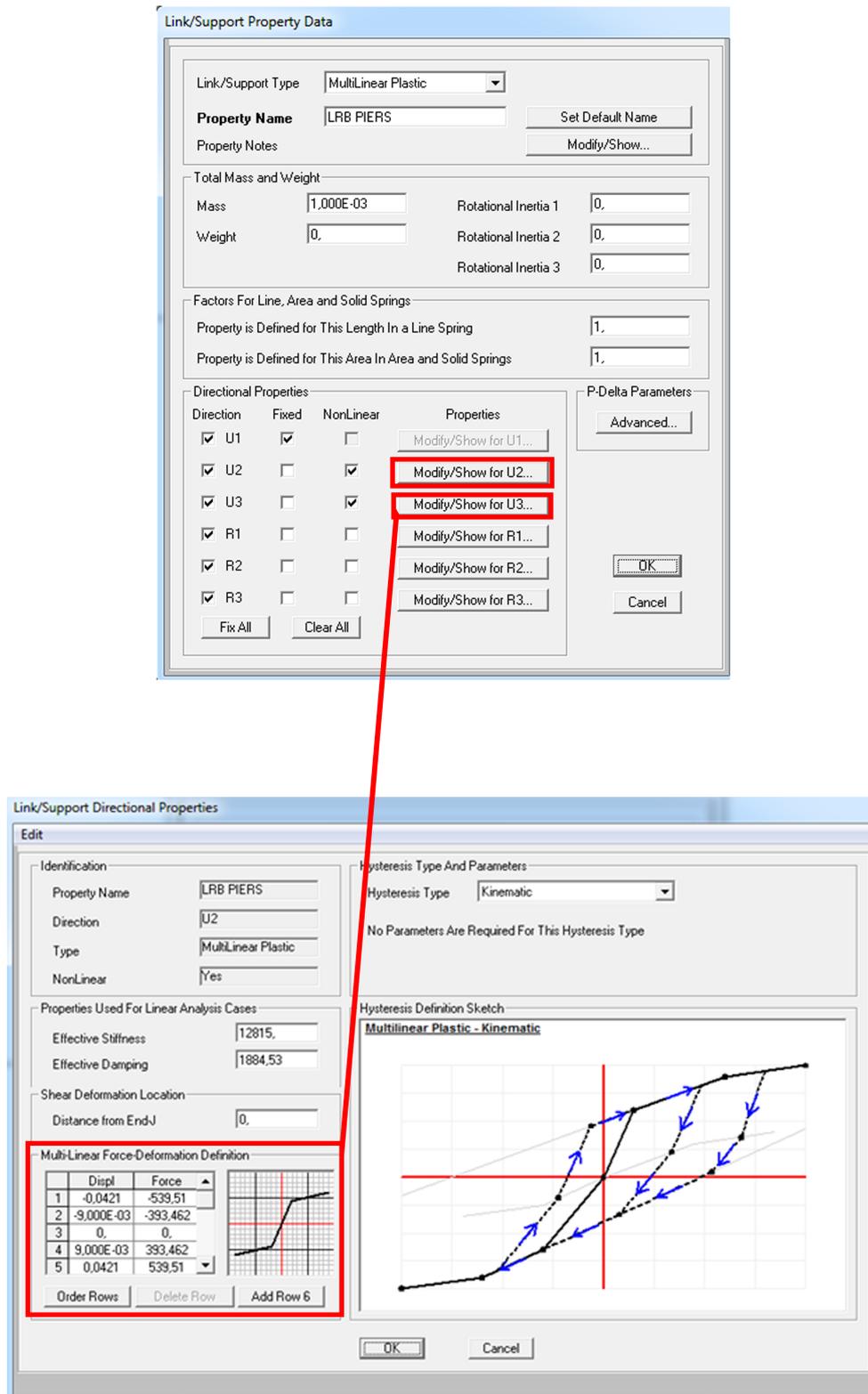


FIGURE 2.9 – Modélisation des isolateurs sismiques de type « LRB » au niveau des piles

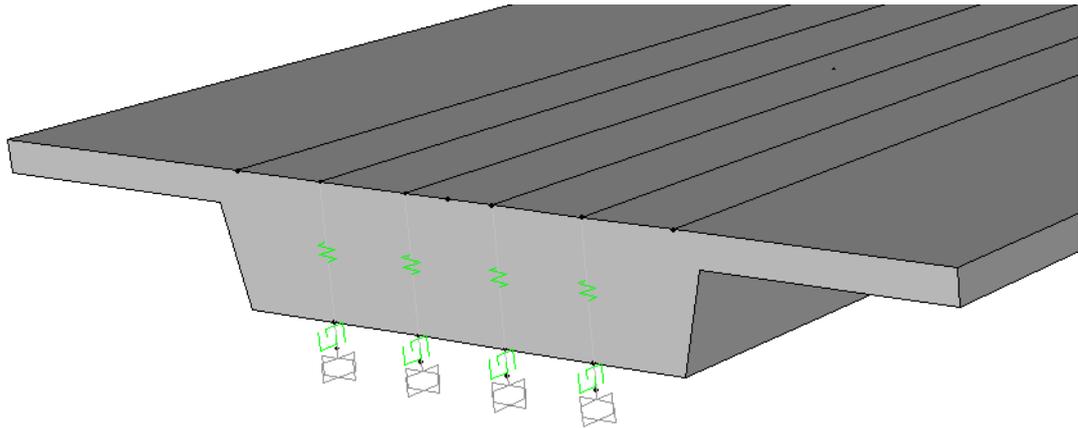


FIGURE 2.10 – Détail de la modélisation des isolateurs sismiques « LRB »

En se basant sur l'organigramme présenté précédemment (Figure 1.3), le dimensionnement de nos dispositifs d'isolation donne les résultats suivants :

Caractéristiques du matériau :

$$E = 4.45 \times 10^{-3} \text{KN.m}^{-2} \quad \varepsilon = 500\% \quad G = 1.06 \times 10^3 \text{KN.m}^{-2}$$

$$\gamma_{max} = 50\% \quad k = 0,57$$

Limite élastique du noyau de plomb :  $f_{py} = 10 \text{ MN.m}^{-2}$

Contrainte normale admissible :  $\sigma_c = 7.84 \times 10^4 \text{ KN.m}^{-2}$

Limite élastique des plaques en acier :  $F_s = 1.65 \times 10^5 \text{ KN.m}^{-2}$

a- La surface du plomb :  $A_p = 0.0355 \text{ m}^2 \Rightarrow d_p = 21.5 \text{ cm}$

b- Hauteur de la couche d'élastomère :  $t_r = 21.05 \text{ cm}$

c- La surface d'élastomère :  $A = \text{Max}(A_0, A_1, A_2)$

d- Sachant que :  $A_0 = 0.796 \text{ m}^2 \quad A_1 = 0,43 \text{ m}^2 \quad A_2 = 0,528 \text{ m}^2$

$\Rightarrow A = 0.796 \text{ m}^2$  (on optera pour une section rectangulaire de  $(90 \times 90) \text{ cm}$  )

e- Epaisseur d'une couche d'élastomère :  $t = 2.25 \text{ cm}$

f- Nombre de couches d'élastomère :  $N = 10$  couches

g- Epaisseur des frettes :  $t_s = 5 \text{ mm}$

h- Hauteur totale :  $H = 31 \text{ cm}$

Les conditions de résistance au cisaillement, de stabilité au flambement, de capacité de diffusion d'énergie et de non-glissement sont toutes satisfaites.

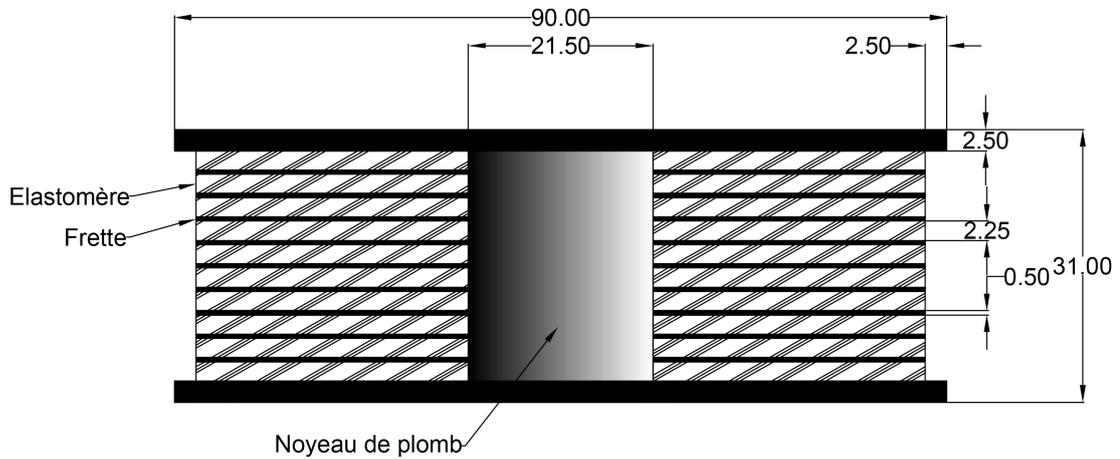


FIGURE 2.11 – Dimension de l'isolateur « LRB »

A présent, nous allons comparer les résultats obtenus par l'analyse dynamique du modèle isolé par « LRB », avec le modèle de référence isolé par « NRB ».

Les tables suivantes résument l'étude comparative entre les deux modèles. Dans la table 2.3, on compare les déplacements maximaux et vitesses maximaux du tablier, et dans la table 2.4 on compare les efforts tranchants développés à la base d'une pile.

TABLE 2.3 – Comparaison des vitesses et déplacements du modèle complètement isolé par « LRB » et par « NRB ».

Accélérogramme	Déplacement (cm)			Vitesse (m/s)		
	LRB	NRB	Réduction (%)	LRB	NRB	Réduction (%)
01	3,19	9,81	67	0,23	0,417	43
02	3,8	10,28	63	0,28	0,442	37
03	2,97	10,1	71	0,28	0,479	41
04	2,96	10,03	70	0,2	0,442	41
05	3,03	9,61	68	0,28	0,452	37
06	2,95	10,58	72	0,24	0,477	48
07	3,61	10,12	64	0,26	0,445	42
08	3,76	10,66	65	0,27	0,527	48
09	2,81	8,04	65	0,26	0,454	41
10	3,14	9,96	68	0,25	0,482	47
11	3,38	9,87	66	0,24	0,433	45
12	3,43	9,82	65	0,24	0,495	50
13	2,79	9,96	72	0,25	0,482	47
14	3,03	10,39	71	0,26	0,457	42
15	3,49	9,28	62	0,3	0,457	34
16	3,07	8,96	66	0,3	0,415	26
17	2,99	10,63	72	0,27	0,448	39
18	3	9,4	67	0,26	0,437	38
19	3,16	10,48	70	0,24	0,433	42
20	3,22	10,37	69	0,25	0,486	48
<b>Moyenne</b>	<b>3,19</b>	<b>9,92</b>	<b>68</b>	<b>0,26</b>	<b>0,458</b>	<b>42</b>

TABLE 2.4 – Comparaison de l'effort tranchant à la base de la pile du modèle complètement isolé par « LRB » et par « NRB ».

Accélérogramme	$V_x$ (KN)			$V_y$ (KN)		
	LRB	NRB	Réduction (%)	LRB	NRB	Réduction (%)
1	2585,87	2022,35	-28	386,13	204,31	-89
2	2801,44	1992,31	-41	396,32	188,00	-111
3	2574,34	1933,80	-33	371,74	199,67	-86
4	2591,80	2036,33	-27	363,09	198,79	-83
5	2623,38	1874,28	-40	376,86	202,92	-86
6	2573,80	2078,24	-24	384,34	208,91	-84
7	2629,09	1970,85	-33	354,33	185,55	-91
8	2613,82	2137,39	-22	399,02	209,57	-90
9	2632,40	1705,37	-54	386,63	194,76	-99
10	2564,90	1953,27	-31	340,98	178,74	-91
11	2623,81	1875,01	-40	348,32	207,51	-68
12	2581,69	2010,99	-28	334,13	200,64	-67
13	2656,06	1998,42	-33	381,49	199,55	-91
14	2611,49	2035,62	-28	389,99	211,97	-84
15	2671,54	1732,31	-54	371,35	207,69	-79
16	2591,02	1851,98	-40	389,32	199,97	-95
17	2611,40	2169,29	-20	343,88	204,31	-68
18	2564,48	1848,30	-39	362,91	199,75	-82
19	2608,54	1897,98	-37	354,97	213,65	-66
20	2599,37	2026,38	-28	388,75	210,66	-85
<b>Moyenne</b>	<b>2615.51</b>	<b>1957.52</b>	<b>-34</b>	<b>371.23</b>	<b>201.35</b>	<b>-84</b>

Nous remarquons à travers ces résultats, que l'introduction des « LRB » dotés d'un taux d'amortissement élevé, a permis de mieux contrôler les déplacements, par une réduction de 68%. On note aussi, qu'une diminution considérable de la vitesse relative du tablier a été enregistrée.

Cependant, la grande rigidité du « LRB » a rendu la structure moins souple, ce qui a amené à l'augmentation de l'effort tranchant à la base de la pile, de 34% dans le sens longitudinal et de 84% dans le sens transversal. Par ailleurs, les distorsions maximales de nos isolateurs, restent inférieures à leurs limites imposées lors du dimensionnement qui est de 20% [table 2.5].

TABLE 2.5 – Distorsions maximales de l'isolateur « LRB »

<b>Accélérogramme</b>	<b>Distorsion (%)</b>
01	10,27
02	12,27
03	9,585
04	9,58
05	9,786
06	9,621
07	11,74
08	12,07
09	9,075
10	10,21
11	10,98
12	11,04
13	9,019
14	9,871
15	11,34
16	10,03
17	9,698
18	9,957
19	10,22
20	10,41
<b>Moyenne</b>	<b>10,34</b>

Les résultats ainsi obtenus sont complétés par les graphes comparatifs des déplacements et des vitesses relatives du tablier :

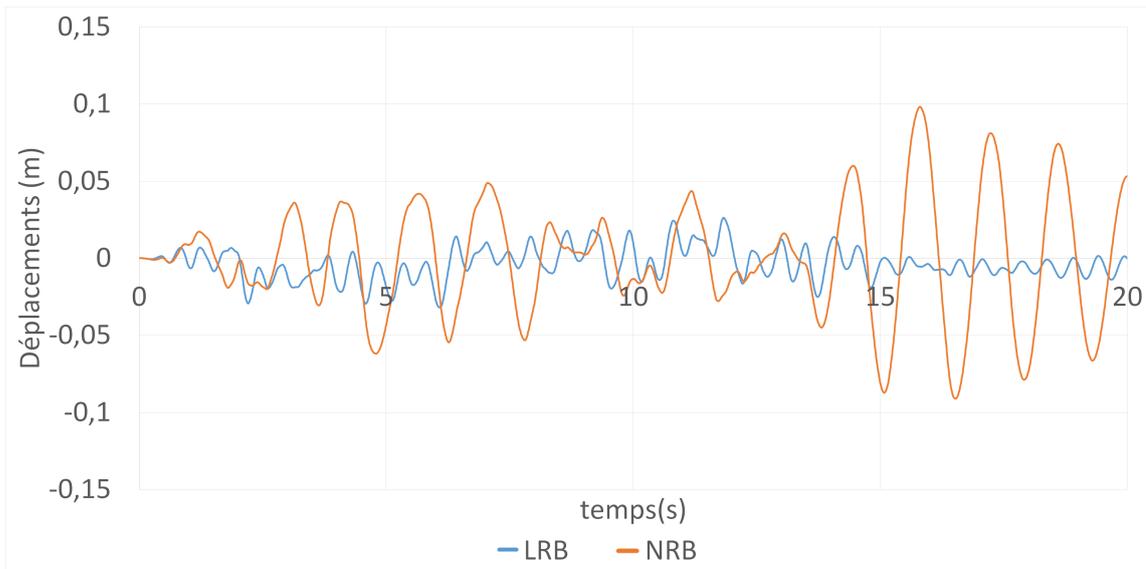


FIGURE 2.12 – Comparaison des déplacements en fonction du temps du modèle complètement isolé par « NRB » et par « LRB »

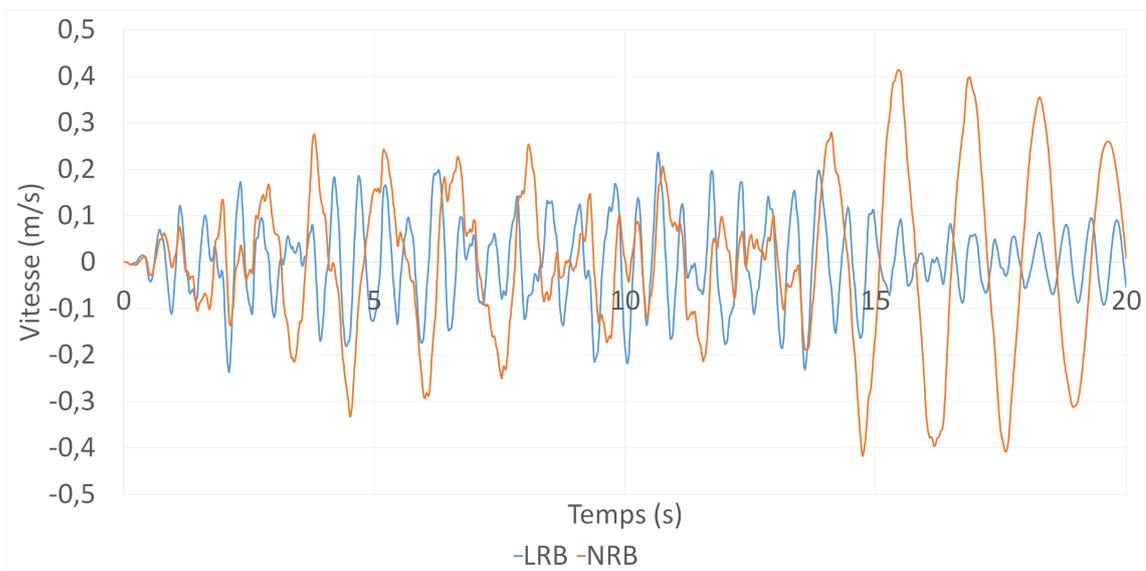


FIGURE 2.13 – Comparaison des vitesses en fonction du temps du modèle complètement isolé par « NRB » et par « LRB »

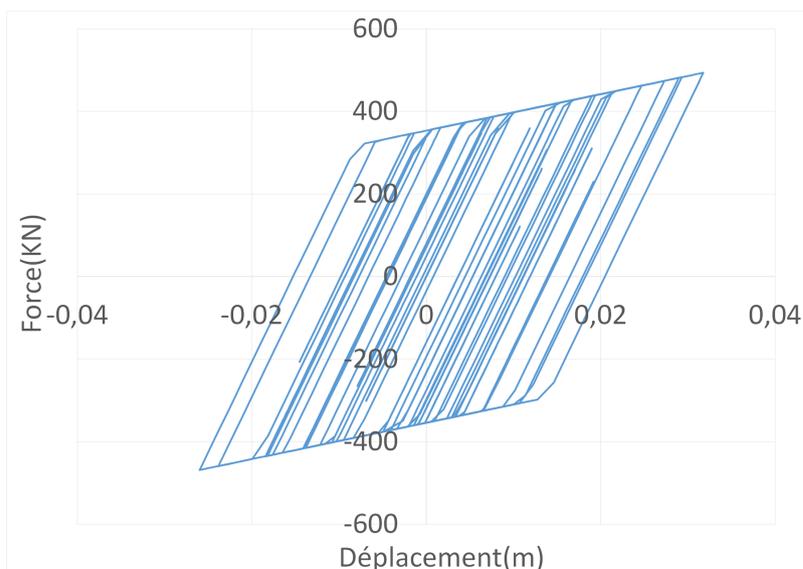


FIGURE 2.14 – Relation force-déplacement de l’isolateur « LRB »

### 2.5.2 Modèle équipé d’amortisseurs externes

Etant donné que la conception précédente s’avère être une solution non économique, due à l’augmentation des efforts à la base, un nouveau modèle d’isolation est proposé. Chaque extrémité du pont est équipée de deux amortisseurs visqueux purs de type  $CV^\alpha$  [figure 2.15]

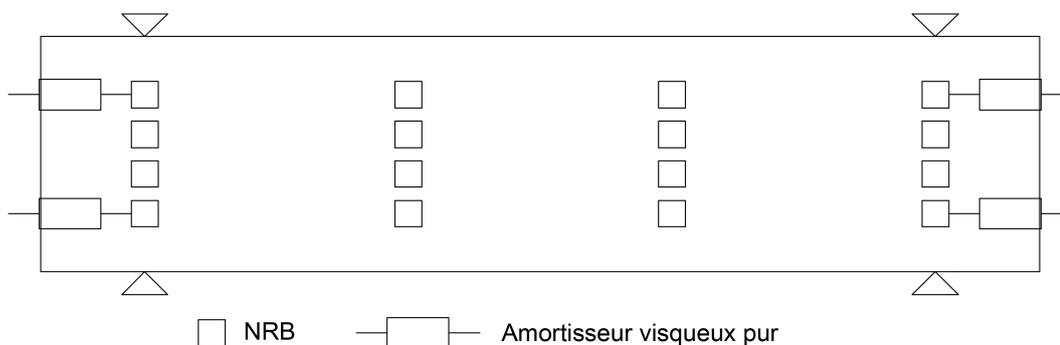


FIGURE 2.15 – Modèle équipé d’amortisseurs externes

Le coefficient d’amortissement de l’amortisseur supplémentaire est estimé par la méthode de pré dimensionnement développée par Michel Kahan.[3]

On obtient un coefficient d’amortissement  $C_{eff}$  égal à  $1347kN.s/m$ .

A noter que l’introduction des amortisseurs n’influe pas sur la période de vibration de la structure, du fait qu’ils ne contribuent pas à rigidifier le système. Cependant la rigidité du liquide visqueux à l’intérieur des amortisseurs est très importante, elle avoisine la valeur de  $9.10^6 KN/m$  [4], ce qui le rend incompressible.

La figure 2.16 illustre la manière avec laquelle on modélise les amortisseurs visqueux non-linéaires.

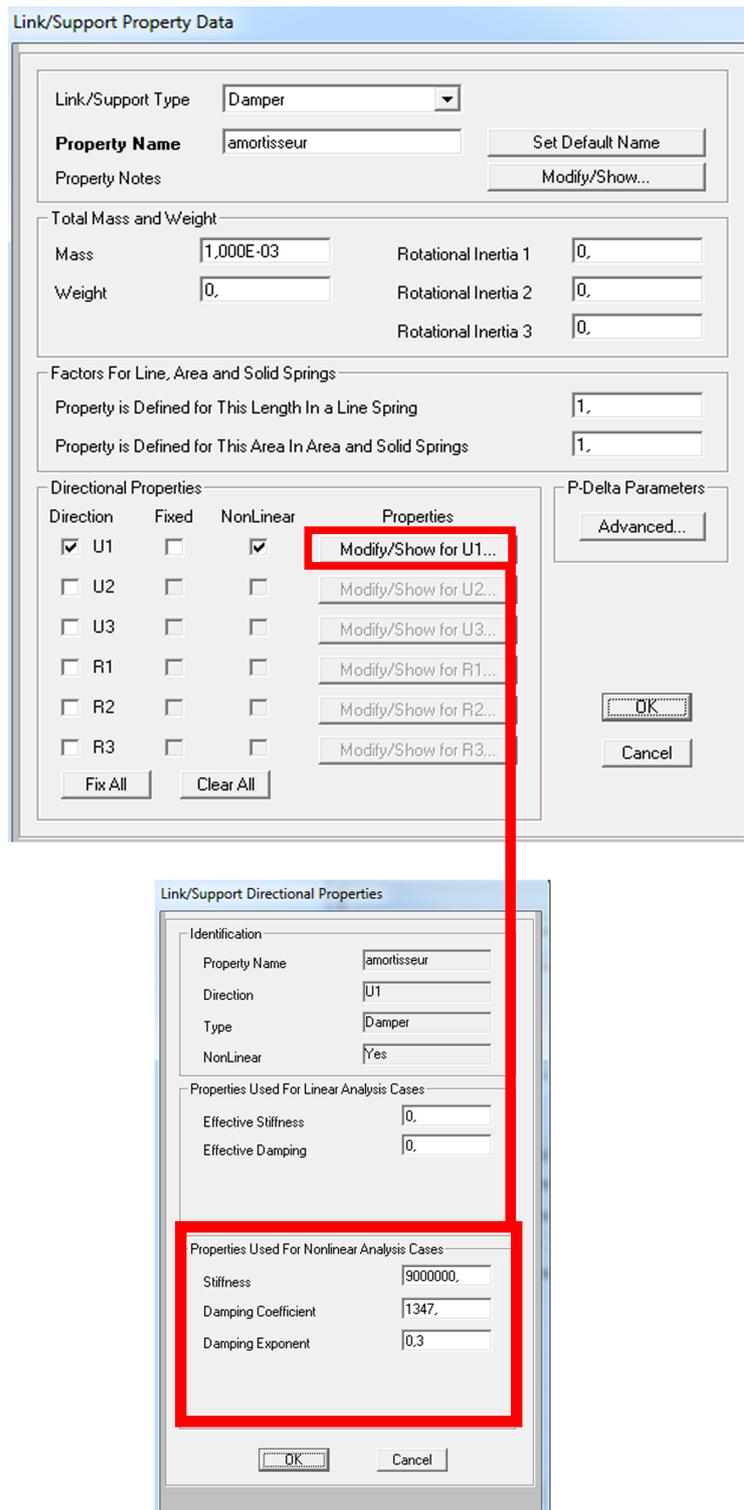


FIGURE 2.16 – Détails de modélisation de l’amortisseur visqueux pur

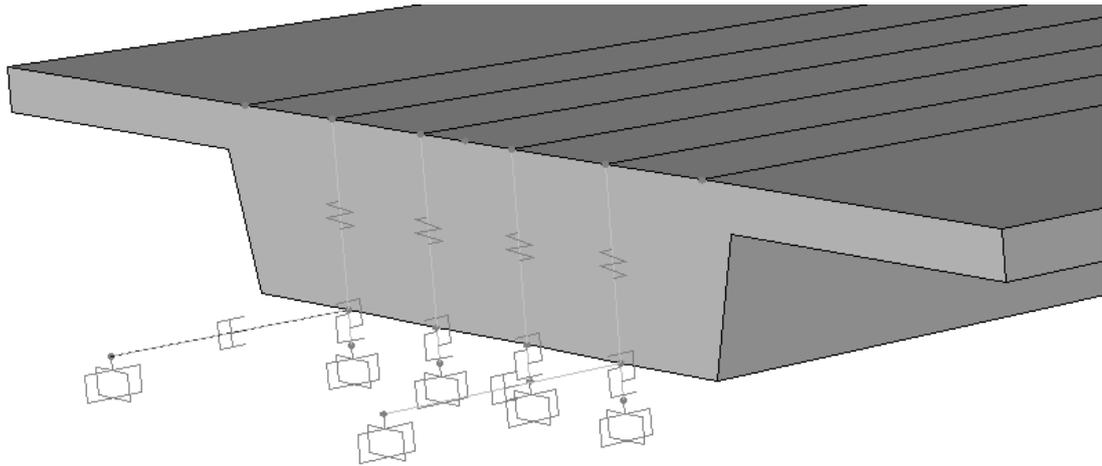


FIGURE 2.17 – Modélisation des amortisseurs visqueux purs sur SAP 2000

Pour évaluer la pertinence du modèle exposé, il est intéressant de le comparer au modèle de référence isolé par « NRB ». Les tableaux suivants résument les résultats obtenus par l'analyse dynamique. Le premier compare les efforts tranchants ( $V_x, V_y$ ) et le moment ( $M_y$ ) à la base d'une pile, alors que pour le second on compare les déplacements, les vitesses et les accélérations du tablier.

TABLE 2.6 – Comparaison des efforts à la base de la pile du modèle isolé avec et sans amortisseurs

Accéléro	$V_x$ (KN)			$V_y$ (KN)			$M_y$ (KN)		
	A.A	S.A	Réduc (%)	A.A	S.A	Réduc (%)	A.A	S.A	Réduc (%)
01	485	2022	76	201	204	1,8	3337	15692	79
02	648	1992	67	183	188	2,7	4530	15828	71
03	536	1934	72	194	200	2,9	3779	15444	76
04	573	2036	72	193	199	3,1	4235	15908	73
05	594	1874	68	199	203	1,9	4079	15063	73
06	521	2078	75	202	209	3,3	3694	16479	78
07	561	1971	72	181	186	2,6	3641	15300	76
08	522	2137	76	205	210	2,4	3420	16786	80
09	639	1705	63	188	195	3,3	4384	13116	67
10	460	1953	76	178	179	0,7	3137	15289	79
11	490	1875	74	203	208	2,1	3433	15102	77
12	610	2011	70	199	201	0,8	4130	15341	73
13	483	1998	76	196	200	1,8	3376	15839	79
14	542	2036	73	204	212	3,9	4042	16049	75
15	568	1732	67	204	208	1,7	4183	13958	70
16	505	1852	73	193	200	3,3	3459	14362	76
17	571	2169	74	201	204	1,8	3963	16956	77
18	551	1848	70	195	200	2,6	4360	14600	70
19	576	1898	70	206	214	3,4	3965	15386	74
20	520	2026	74	203	211	3,7	3317	15842	79
<b>Moyenne</b>	<b>547</b>	<b>1957</b>	<b>72</b>	<b>196</b>	<b>201</b>	<b>2,5</b>	<b>3823</b>	<b>15416</b>	<b>75</b>

Accéléro : Accélérogramme

A.A : avec amortisseurs externes

S.A : sans amortisseurs externes

TABLE 2.7 – Comparaison des déplacements, vitesses et accélérations du modèle isolé avec et sans amortisseurs

Accéléro	Déplacement (cm)			Vitesse (m/s)			Accélération ( $m/s^{-2}$ )		
	A.A	S.A	Réduc (%)	A.A	S.A	Réduc (%)	A.A	S.A	Réduc (%)
01	2,1	9,8	79	0,19	0,42	55	2,6	3,0	14
02	2,46	10,3	76	0,19	0,44	57	2,6	3,7	29
03	2,02	10,1	80	0,16	0,48	66	3,2	4,7	34
04	2,26	10,0	78	0,18	0,44	60	2,8	3,7	25
05	2,42	9,6	75	0,14	0,45	70	2,8	3,7	25
06	2,18	10,6	79	0,15	0,48	69	2,5	3,8	36
07	2,08	10,1	80	0,16	0,45	65	2,7	4,0	33
08	2,03	10,7	81	0,17	0,53	69	3,1	3,9	20
09	2,7	8,0	66	0,19	0,46	57	3,0	3,9	23
10	1,96	10,0	80	0,16	0,48	67	2,7	3,8	29
11	1,91	9,9	81	0,15	0,43	65	2,3	3,7	38
12	2,48	9,8	75	0,17	0,50	66	3,2	4,1	22
13	2,09	10,0	79	0,18	0,48	64	3,1	3,8	19
14	2,29	10,4	78	0,18	0,46	61	2,7	3,6	25
15	2,37	9,3	75	0,20	0,46	57	2,8	4,0	30
16	1,87	9,0	79	0,17	0,42	60	3,1	4,5	32
17	2,11	10,6	80	0,17	0,45	62	2,8	3,6	21
18	2,47	9,4	74	0,14	0,44	68	3,4	3,3	-3
19	2,17	10,5	79	0,15	0,43	66	2,7	4,5	40
20	2,16	10,4	79	0,15	0,49	69	2,7	3,7	26
<b>Moyenne</b>	<b>2,21</b>	<b>9,92</b>	<b>77</b>	<b>0,16</b>	<b>0,45</b>	<b>63</b>	<b>2,83</b>	<b>3,85</b>	<b>26</b>

Accéléro : Accélérogramme

A.A : avec amortisseurs externes

S.A : sans amortisseurs externes

L'incorporation d'amortisseurs visqueux purs au niveau des extrémités, a induit à une réduction des efforts à la base. On observe une diminution de l'ordre de : 72% de l'effort tranchant dans le sens longitudinal ( $V_x$ ), et de 75% du moment fléchissant ( $M_y$ ). A signaler que l'effort tranchant dans le sens transversal ( $V_y$ ) reste pratiquement constant.

On remarque que cette solution apporte aussi une diminution considérable des déplacements, des vitesses et des accélérations, plus grande que celle enregistrée pour le modèle complètement isolé par « LRB ».

Les résultats ainsi obtenus sont complétés par des graphes comparatifs entre le modèle présenté et le modèle de référence isolé par « NRB » :

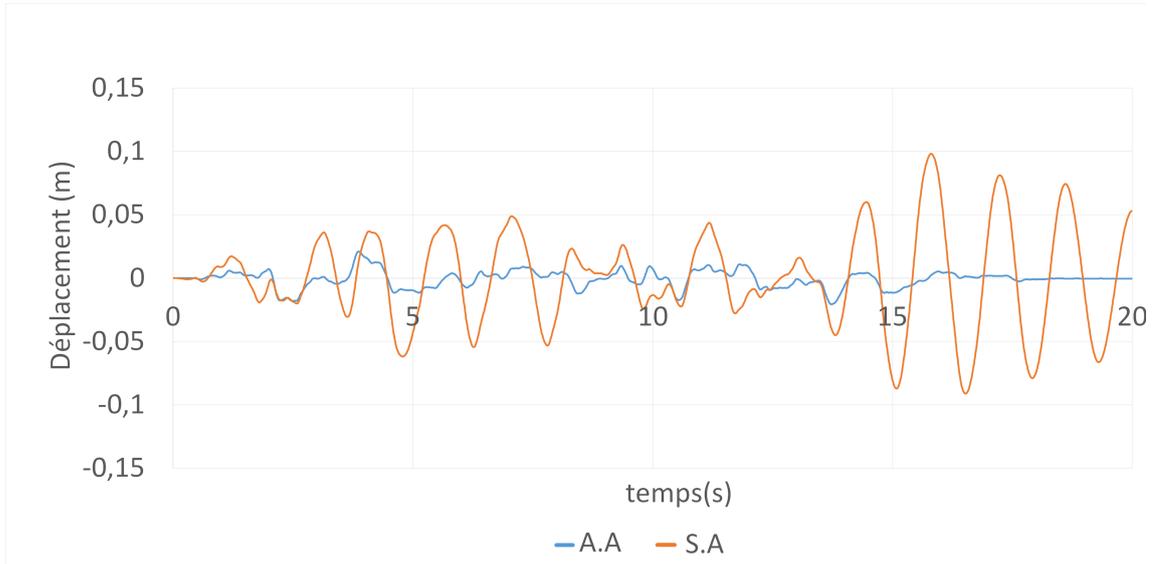


FIGURE 2.18 – Comparaison des déplacements en fonction du temps du modèle isolé par « NRB » avec et sans amortisseurs supplémentaires.

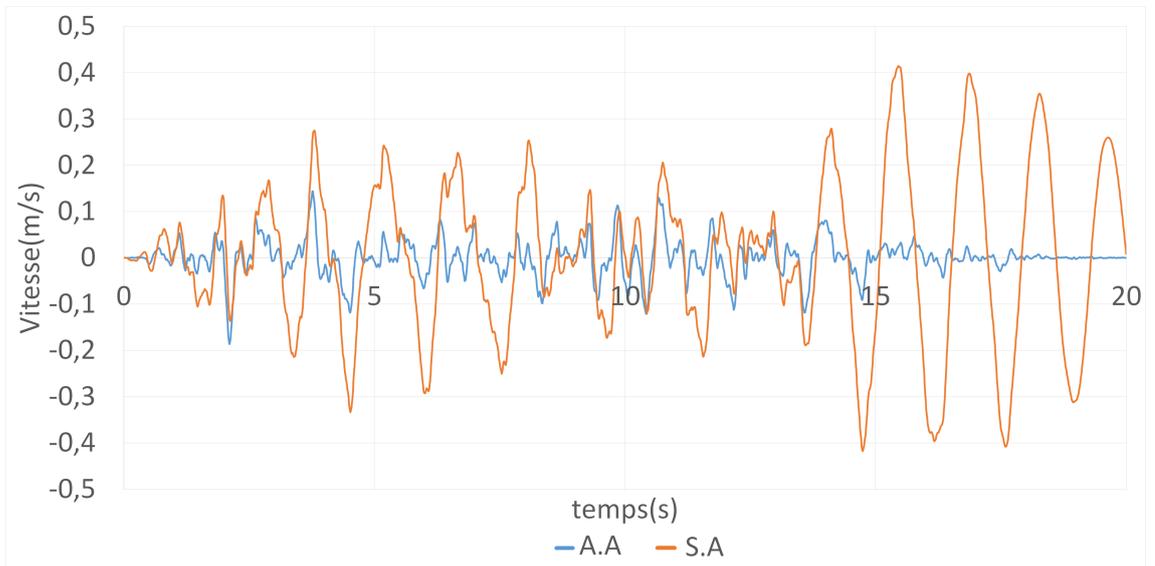


FIGURE 2.19 – Comparaison des vitesses en fonction du temps du modèle isolé par « NRB » avec et sans amortisseurs supplémentaires.

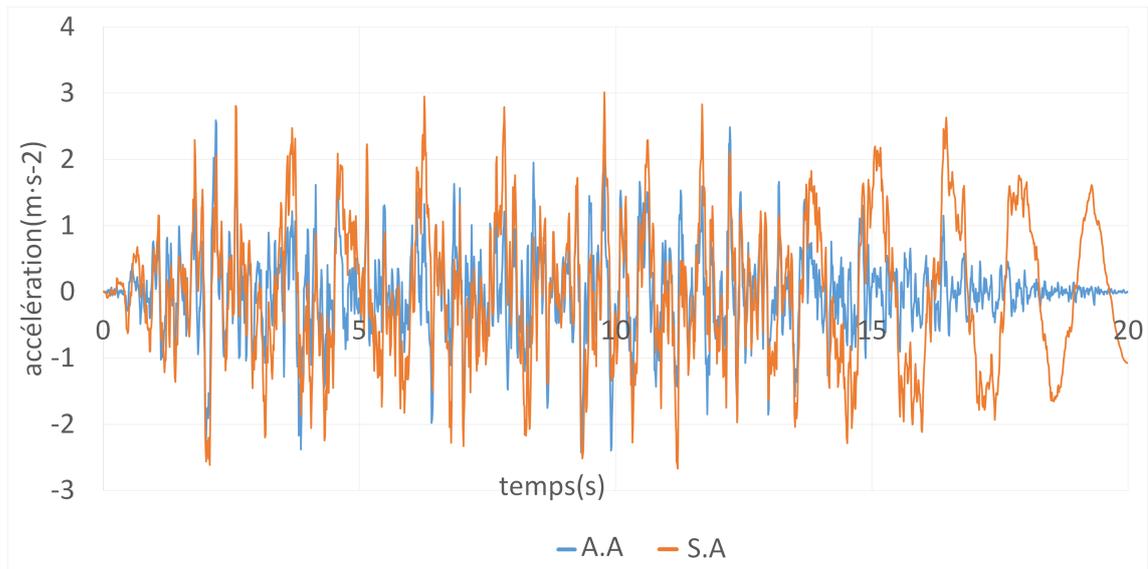


FIGURE 2.20 – Comparaison des accélérations en fonction du temps du modèle isolé par « NRB » avec et sans amortisseurs supplémentaires.

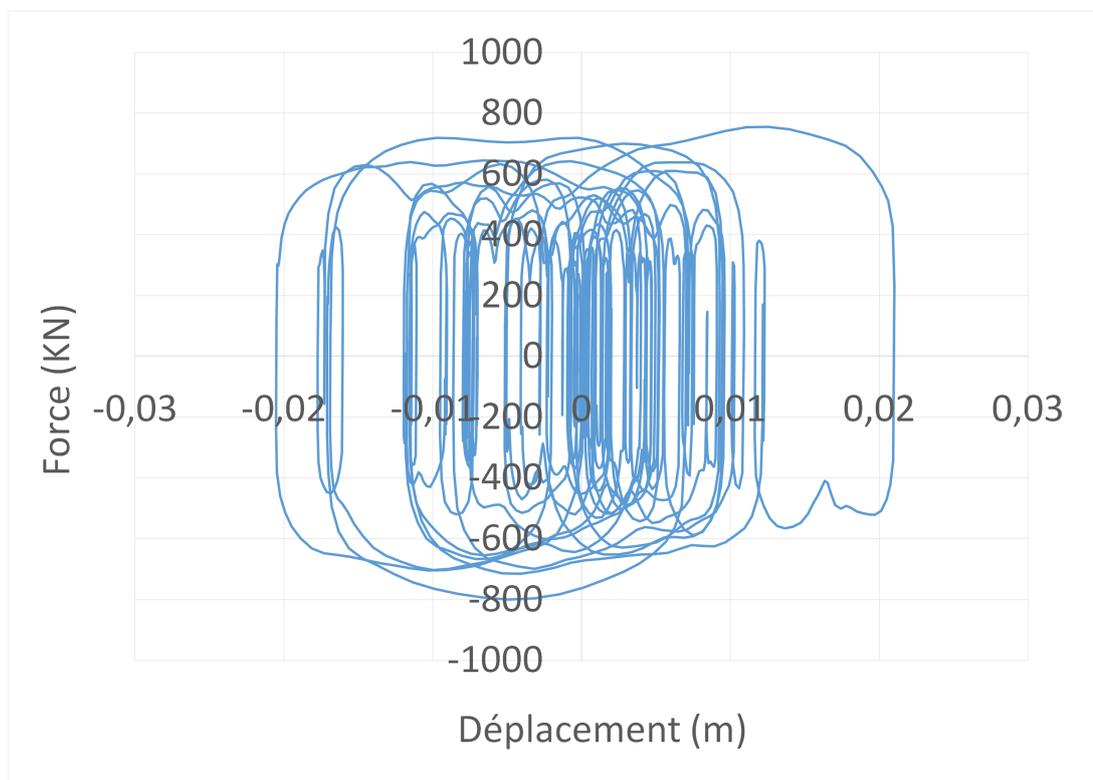


FIGURE 2.21 – Loi de comportement de l'amortisseur visqueux pur de type «  $CV^\alpha$  »

# Chapitre 3

## Etude paramétrique sur les propriétés de l'isolateur de type « LRB »

### 3.1 Principe

La Conception proposée par utilisation d'isolateurs sismiques de type « LRB », a permis de mener une étude paramétrique sur l'influence du choix du taux d'amortissement sur l'ensemble des paramètres. Durant cette étude, on déterminera les différentes propriétés et dimensions des isolateurs « LRB », et cela pour différents taux d'amortissement compris dans l'intervalle suivant :  $20\% \leq \xi_{eff} \leq 35\%$ .

Ceci se fera pour une période d'isolation fixe de 1.4 secondes, qui amènera à une rigidité effective constante de l'ensemble des différents isolateurs.

### 3.2 Résultats et interprétations

L'utilisation de notre programme Matlab [figure 1.2] et de notre organigramme [figure 1.3], a permis de déterminer les valeurs des différents paramètres. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 3.1 – Paramètres des LRB pour différents coefficients d'amortissement

$T_D = 1.40$								
$K_{eff}=12815$								
$\xi(\%)$	<b>D(cm)</b>	<b>Q/W(%)</b>	$K_p(\mathbf{KN})$	$K_e(\mathbf{KN})$	$D_y(\mathbf{mm})$	$d_p(\mathbf{cm})$	<b>N</b>	<b>Dim(m)</b>
33	4,21	5,69	4371,8	43718	9	21,27	10	0,9 × 0,9
30	4,47	4,98	5866,6	58666	5,9	19,89	10	1 × 1
25	4,87	4,28	7335,8	73358	4	18,43	11	1,1 × 1,1
20	5,4	3,68	8554,6	85546	3	17,1	12	1,25 × 1,25

La table 3.1 montre que le taux d'amortissement influe sur la majorité des paramètres. Les points à retenir sont :

- Le fait de diminuer la valeur du taux d'amortissement, entraîne une augmentation du déplacement cible  $D_{cible}$ .
- L'augmentation du déplacement cible, amène à la baisse de la résistance caractéristique  $Q$  et du déplacement élastique  $D_y$ , et ainsi qu'à la hausse de la rigidité élastique ( $K_e$ ) et plastique ( $K_p$ ).
- Le nombre de couches d'élastomères est en fonction du déplacement cible, la hausse de ce dernier entraîne l'addition du nombre de couches.
- La réduction de la résistance caractéristique  $Q$ , se répercutera sur le diamètre du noyau de plomb qui diminuera à son tour.
- La détermination des dimensions en plan de la surface des élastomères est dépendante du taux d'amortissement souhaité, car la réduction de la surface du plomb augmentera la vulnérabilité à la rupture de l'isolateur par effort de cisaillement, cette défaillance sera comblée par la variation des dimensions en plan des élastomères, qui augmenteront pour chaque diminution de la valeur du taux d'amortissement.

Les résultats obtenus sont complétés par des graphes illustratifs (figure 3.1), qui montrent l'influence du choix du taux d'amortissement sur la relation force-déplacement de l'isolateur sismique.

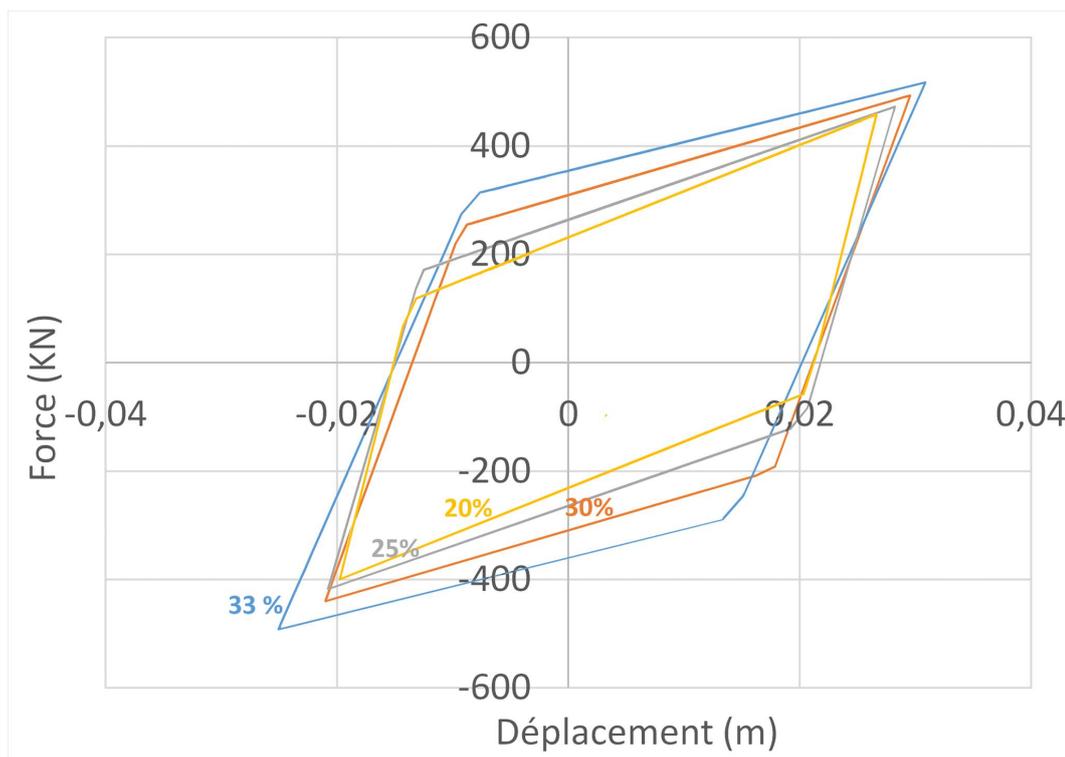


FIGURE 3.1 – la relation force-déplacement des « LRB » de taux d'amortissement différents

On observe de la figure 3.1, que la pente est identique pour tous les isolateurs, cela est dû à la rigidité effective constante résultante du choix de la période d'isolation. Cependant, la variation des surfaces à l'intérieur de la courbe est flagrante. En effet, on remarque une proportionnalité entre le taux d'amortissement et la surface intérieure délimitée par la courbe, c'est-à-dire : plus le taux d'amortissement est grand, plus la surface à l'intérieur de la courbe est grande. Cette variation est relative à la quantité d'énergie dissipée par le système d'isolation, car plus l'amortissement est élevé, plus la dissipation à l'intérieur du dispositif demeure élevée.

# Conclusion

Durant cette étude, différentes conceptions basées sur le principe de l'isolation sismique ont été illustrées sur un pont dalle isolé par des « Natural Rubber Bearing », placés au niveau des piles et des culées. L'isolation a été effectuée par l'introduction d'isolateurs sismiques de type « LRB » et d'amortisseurs visqueux purs. L'évaluation de ce principe d'isolation a été établie par l'analyse dynamique temporelle non linéaire, conduite par des accélérogrammes artificiels générés à partir du spectre réglementaire du « RPOA ».

A partir des résultats obtenus pour les deux modèles, il est possible à présent de tirer les conclusions suivantes :

- L'incorporation des isolateurs sismiques de type «LRB» à la place des «NRB», conduit à l'augmentation de l'amortissement et de la rigidité du système, qui entraîne une meilleure maîtrise des déplacements par une réduction de 68%. Par ailleurs, le fait de rendre la structure moins souple, augmente la valeur de l'effort tranchant à la base des piles. Ceci nous amène à dire, que cette conception d'isolation s'avère une solution non économique.
- L'introduction d'amortisseurs visqueux purs de type «  $CV^\alpha$  » en parallèle avec les « NRB », a permis de régulariser le problème de l'augmentation des efforts à la base des piles rencontré lors de la conception par « LRB ». Cette conception a entraîné une baisse de 72% de l'effort tranchant ( $V_x$ ), et de 75% du moment fléchissant ( $M_y$ ). A noter aussi qu'une atténuation des déplacements, des vitesses et des accélérations a été enregistrée. De ce fait, on peut dire que cette conception s'avère efficace en termes de réduction des efforts et de maîtrise des déplacements.
- L'étude paramétrique menée, met en évidence l'influence du taux d'amortissement fixé sur l'ensemble des paramètres de l'isolateur sismique « LRB ».
- L'analyse dynamique temporelle par « FNA » (Fast Non linear Analysis) génère des résultats plus rapidement que celle de Newmark.

# Bibliographie

- [1] Naiem F & Kelly J.M. *Design of Seismic Isolated Structures*. John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [2] Chang K& Yau J Yang Y. *Earthquake Engineering Handbook*. Charles Scawthorn & Wai-Fah Chen, Boca Raton, USA, 2003.
- [3] Vivier A & Davi D. Prise en compte des dispositifs antisismiques dans les calculs ouvrages d'art sous séisme. *8ème Colloque National AFPS, Ecole des Ponts ParisTech*, 2011.
- [4] Oudai N & Smaoui A. Mémoire de fin d'études sur les méthodes d'analyse dynamique appliquées aux amortisseurs visqueux non linéaires : Evaluation et application au calcul des ponts,. *Directeur du thèse Pr. Tiliouine.B, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie*, 2013.

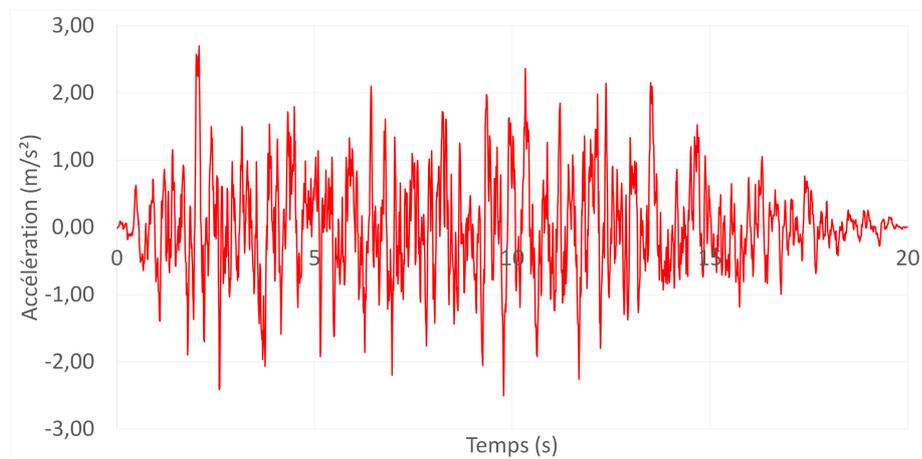
# Annexe A

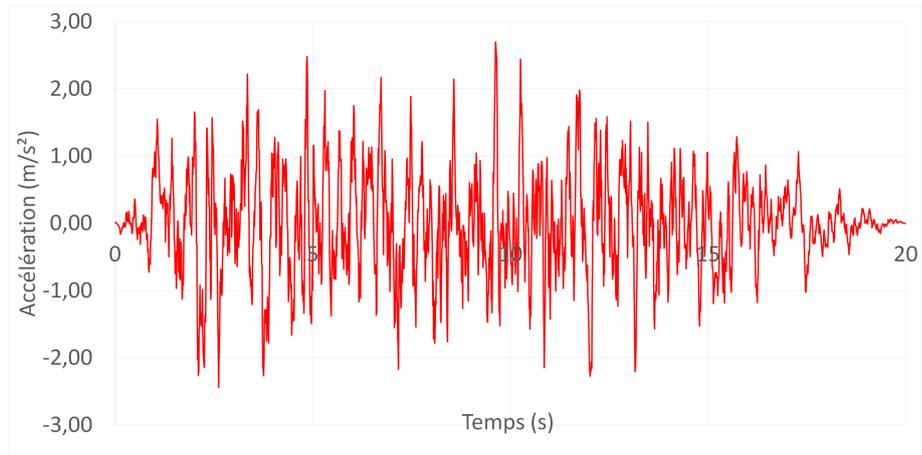
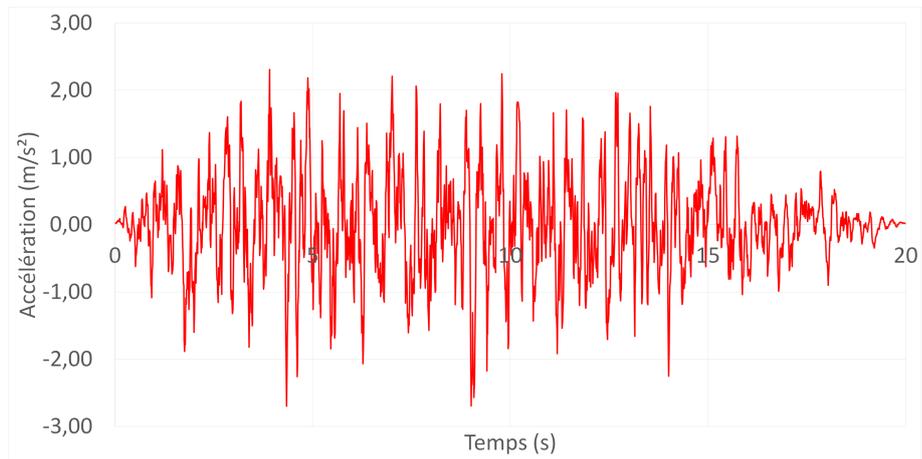
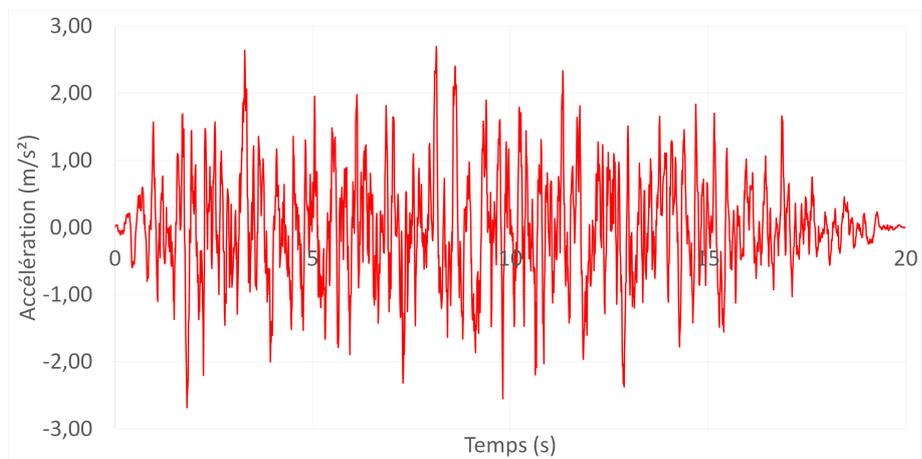
## Accélérogrammes

Les accélérogrammes générés à partir du spectre réglementaire du « RPOA » par SIMQKE :

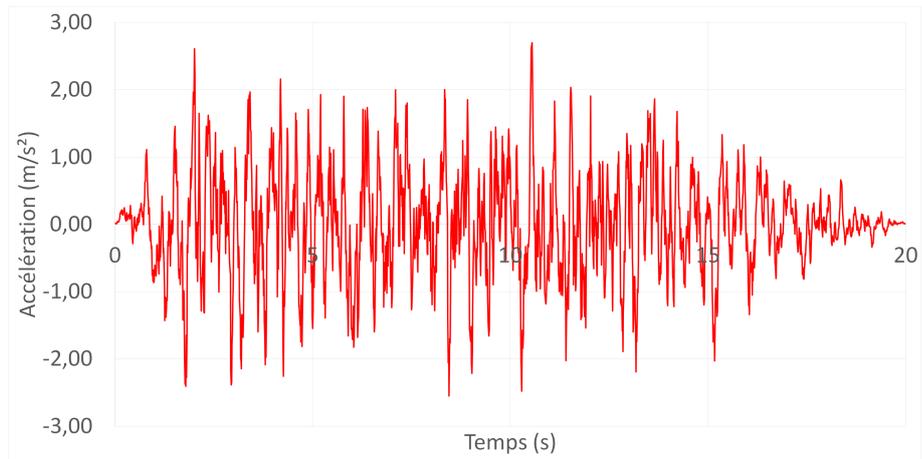
**-A partir du spectre élastique horizontal :**

**1-**

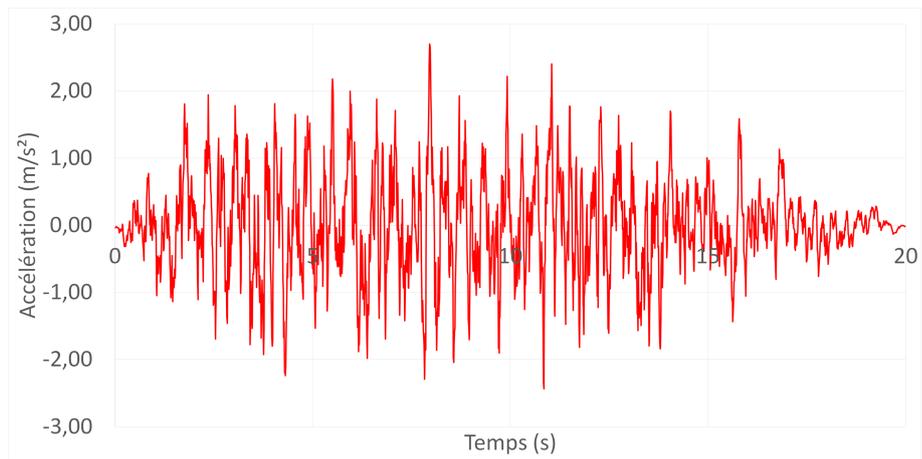


**2-****3-****4-**

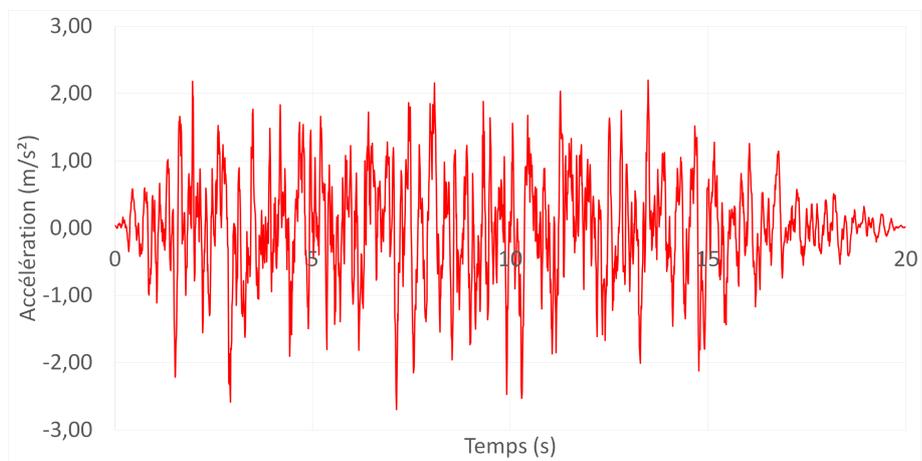
5-

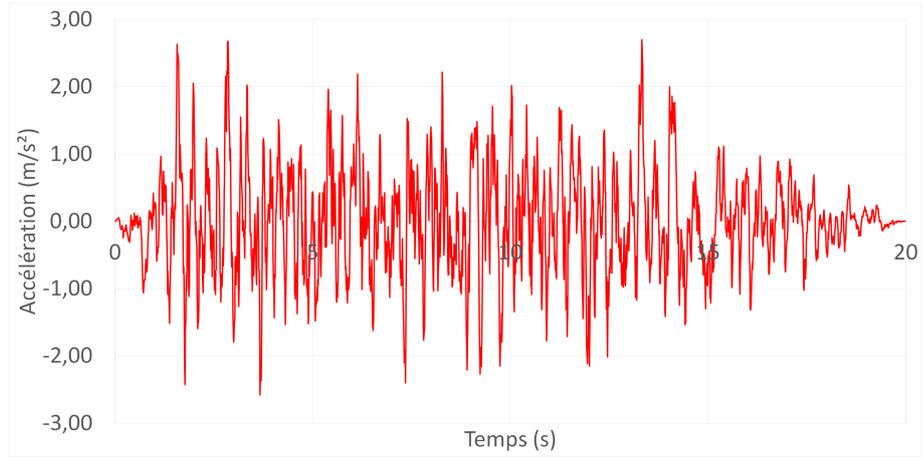
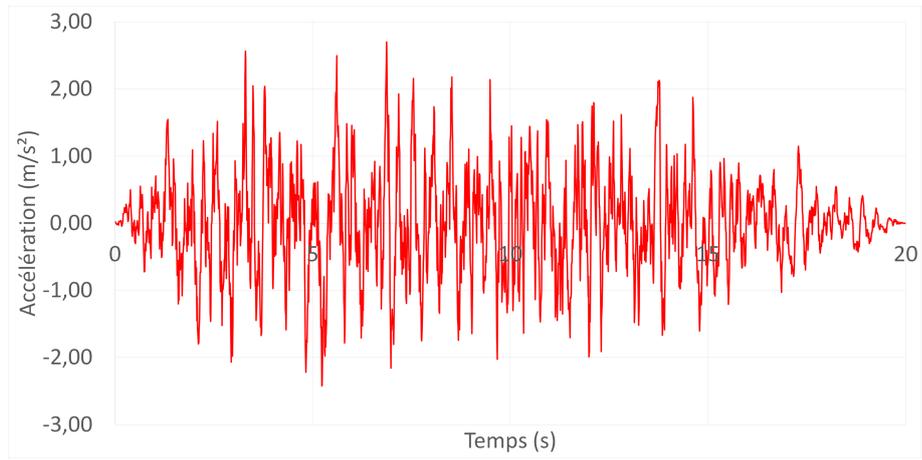
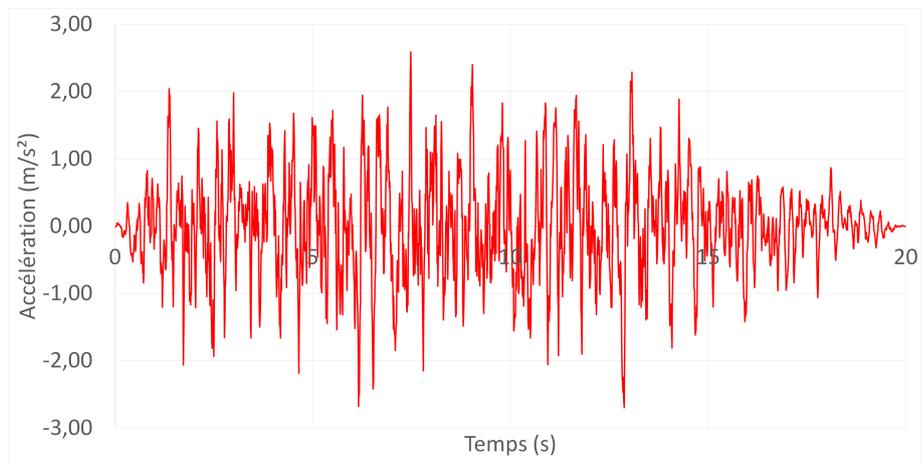


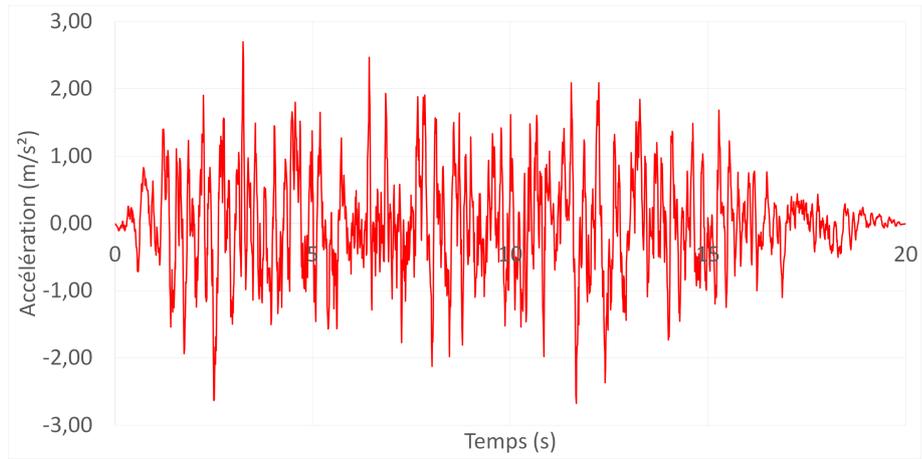
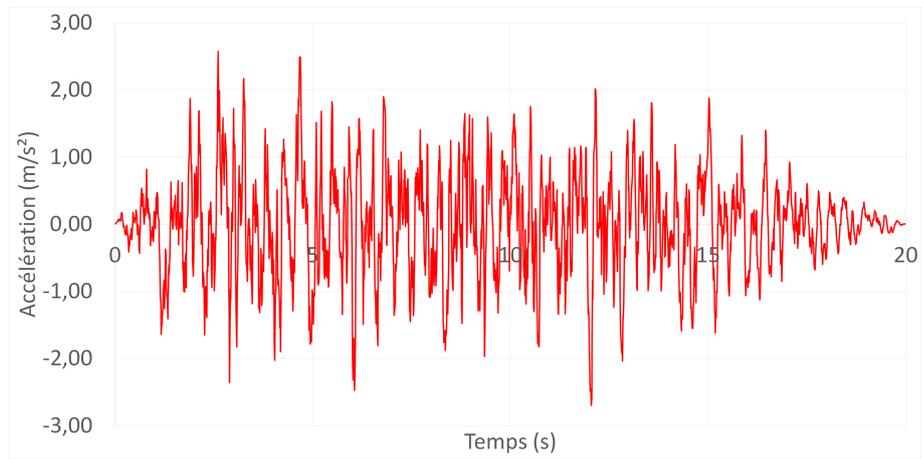
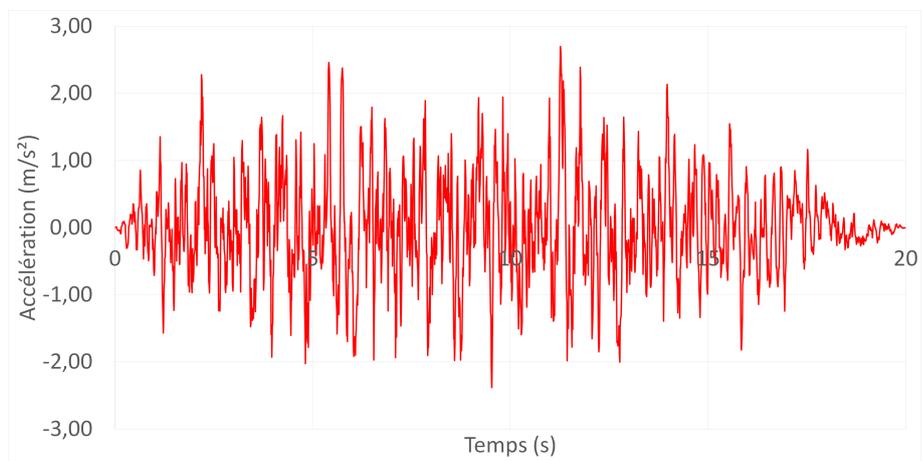
6-

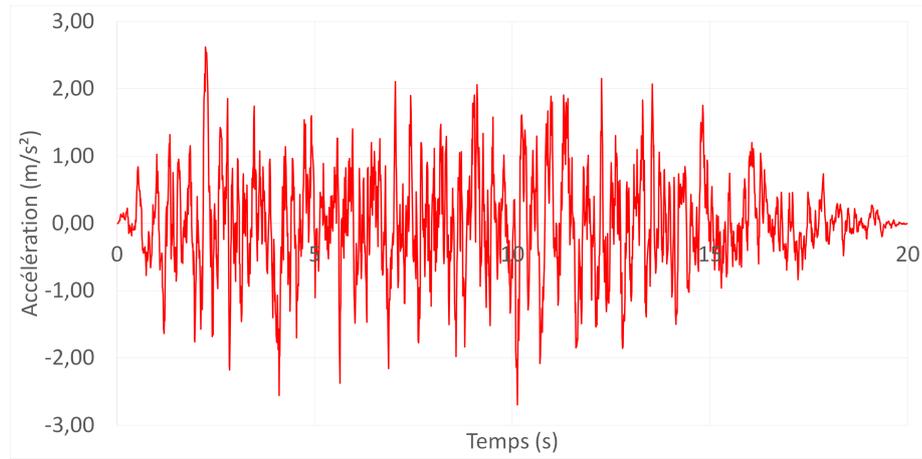
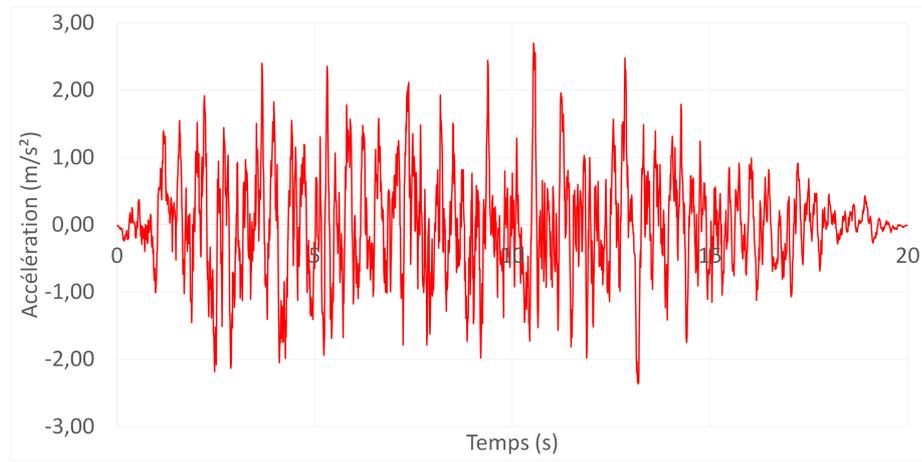
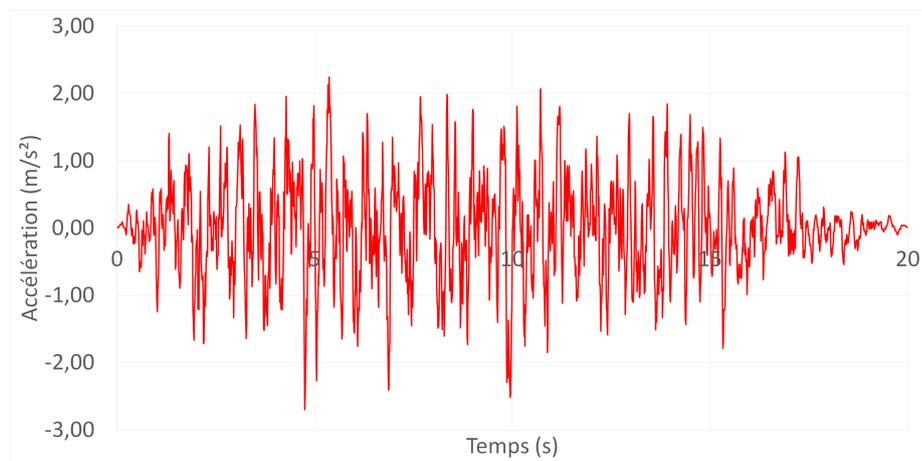


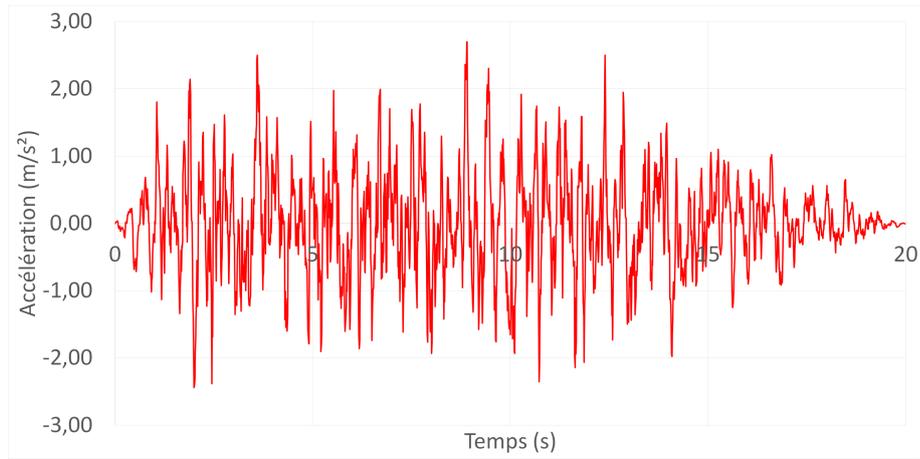
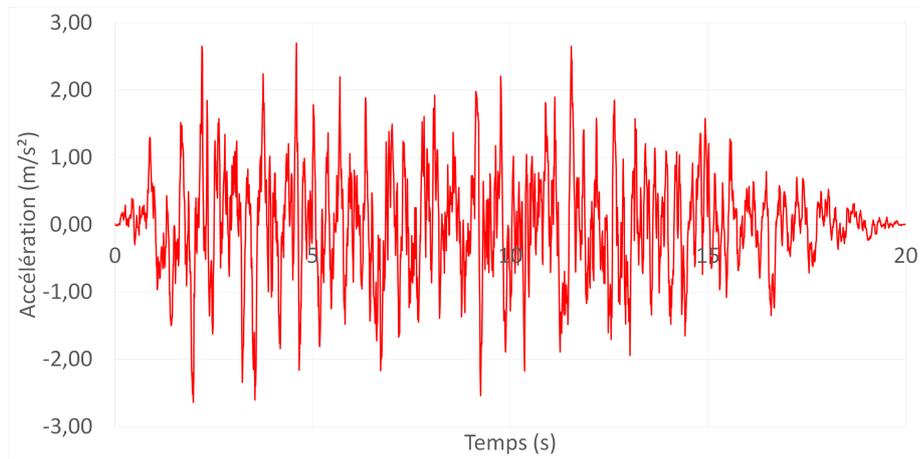
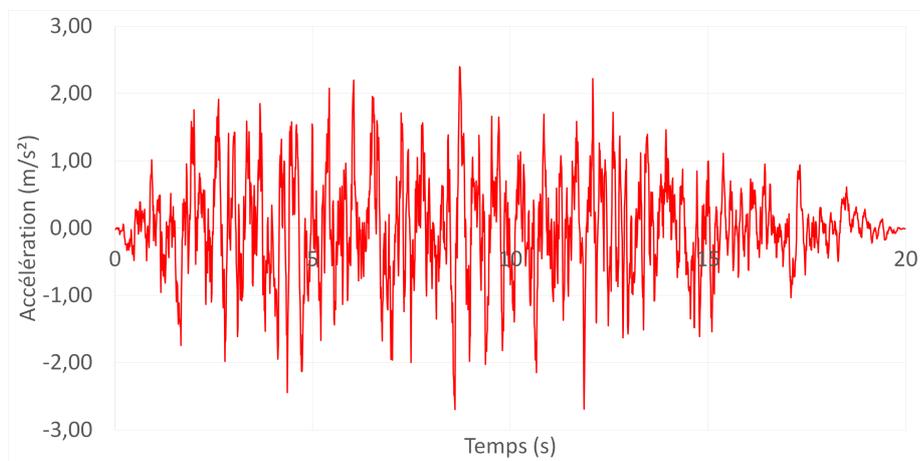
7-

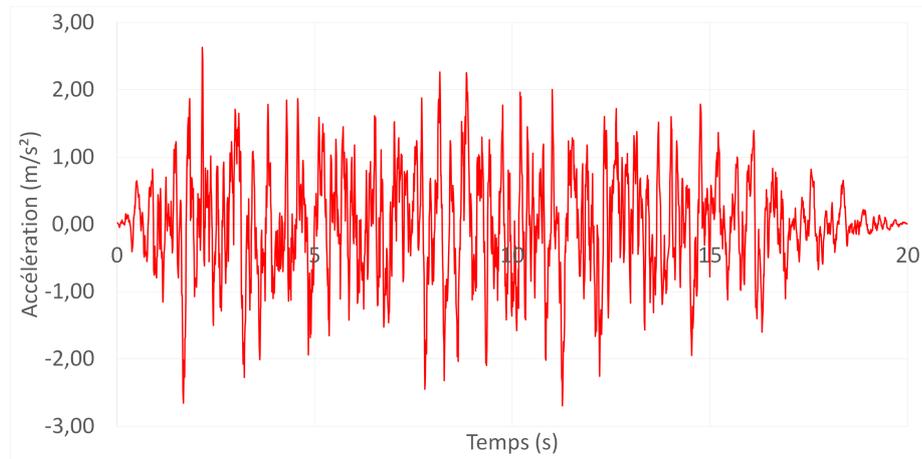
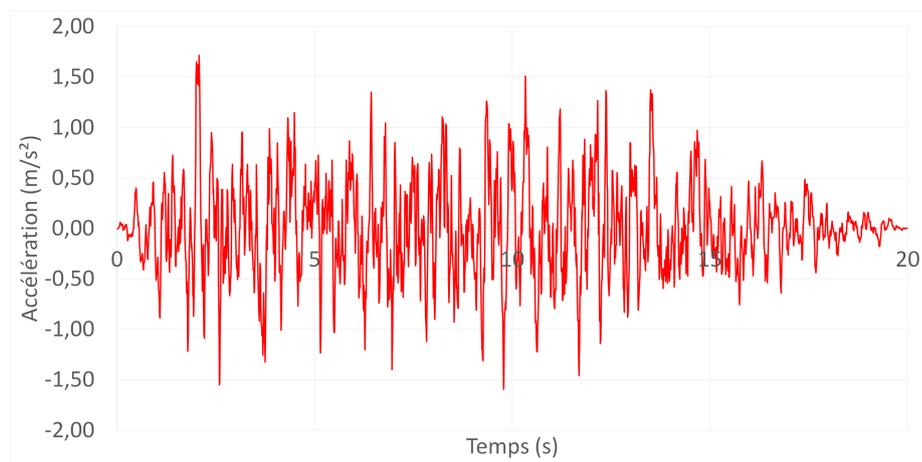
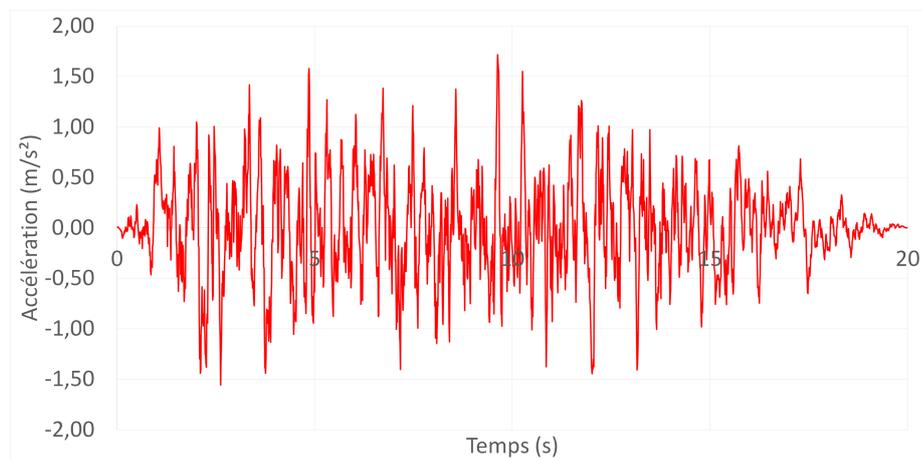


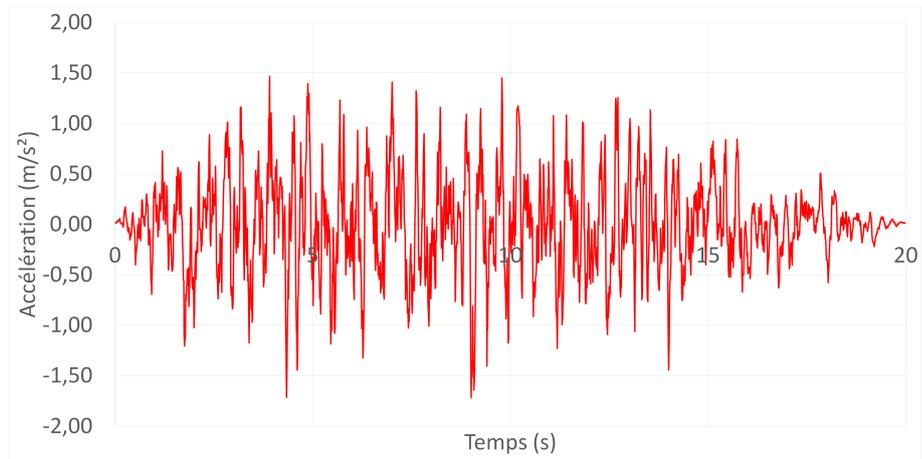
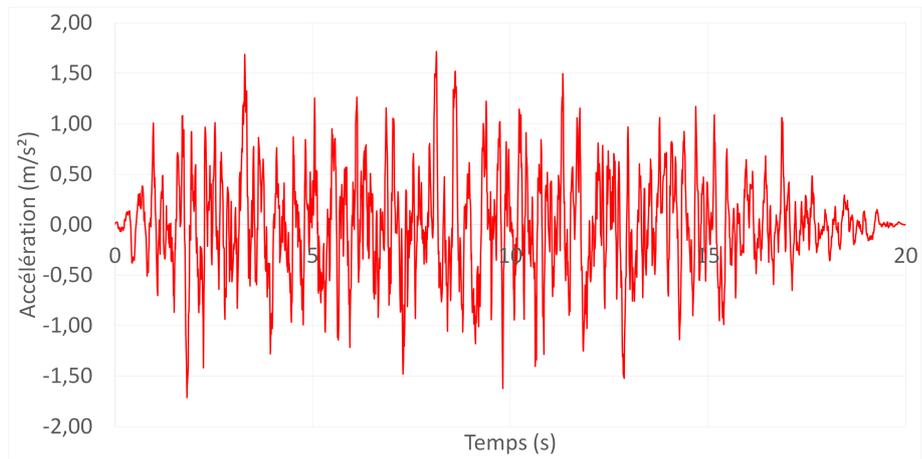
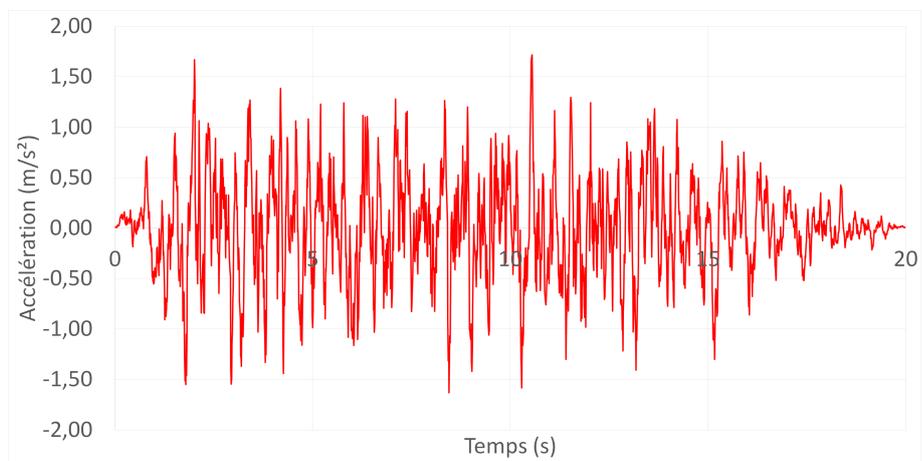
**8-****9-****10-**

**11-****12-****13-**

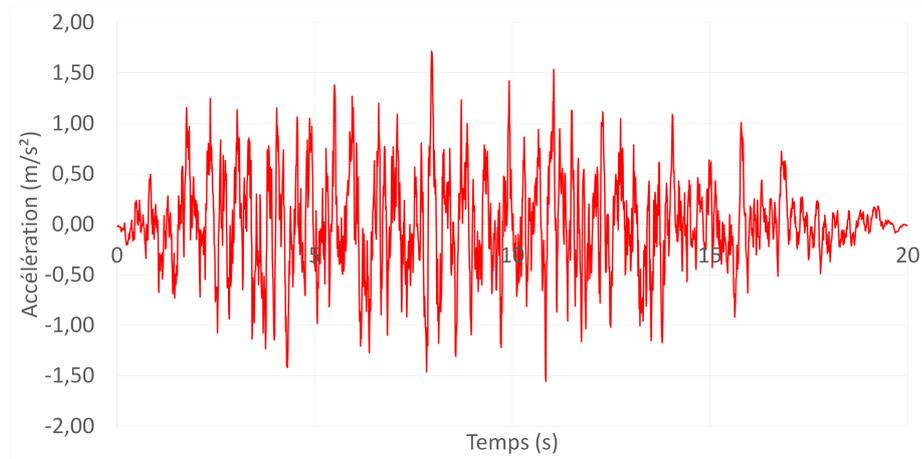
**14-****15-****16-**

**17-****18-****19-**

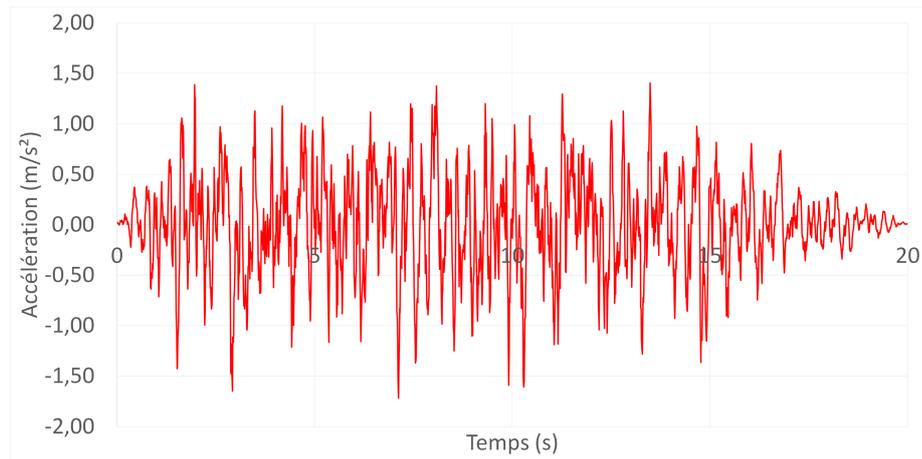
**20-****A partir du spectre élastique vertical :****1-****2-**

**3-****4-****5-**

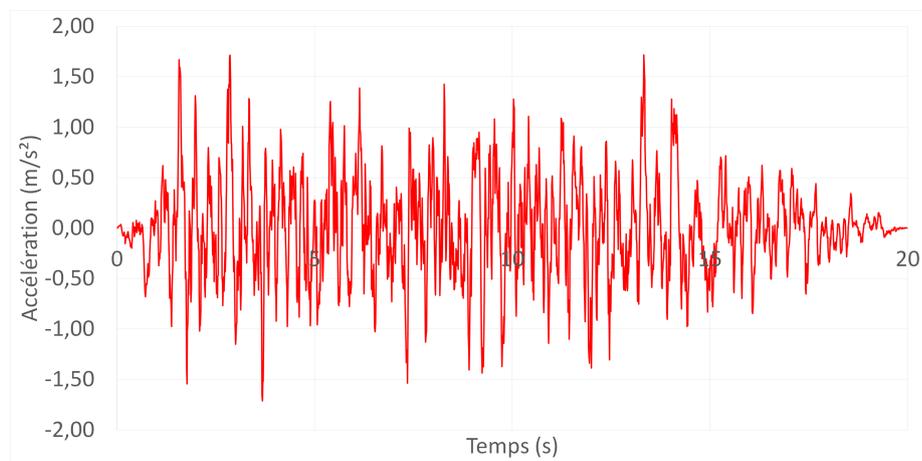
6-

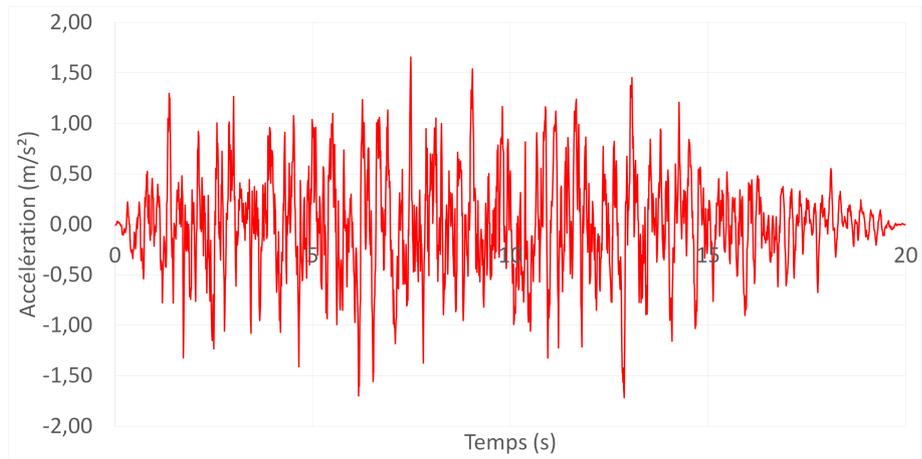
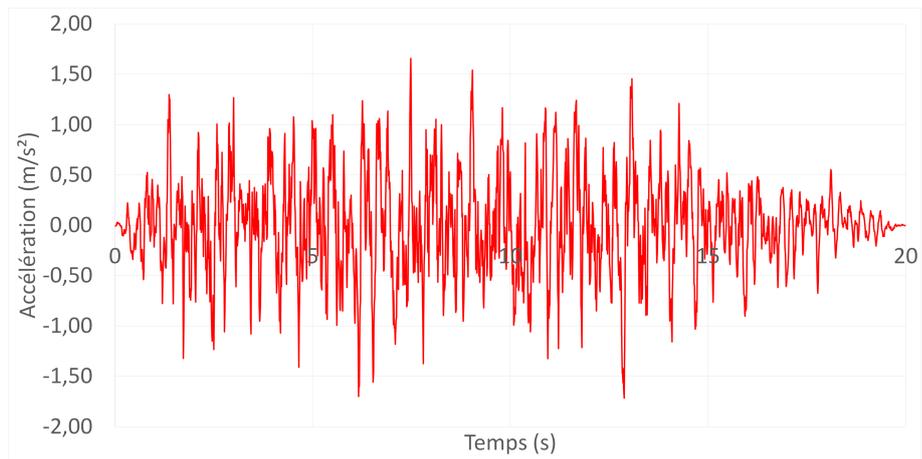
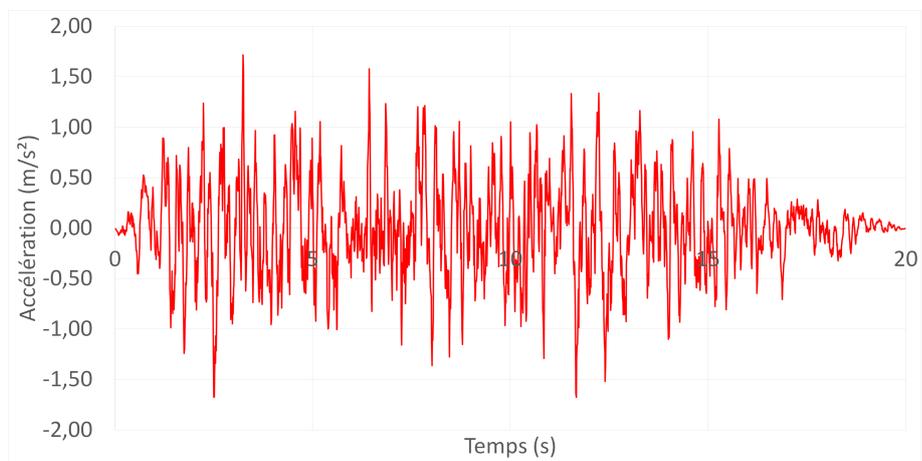


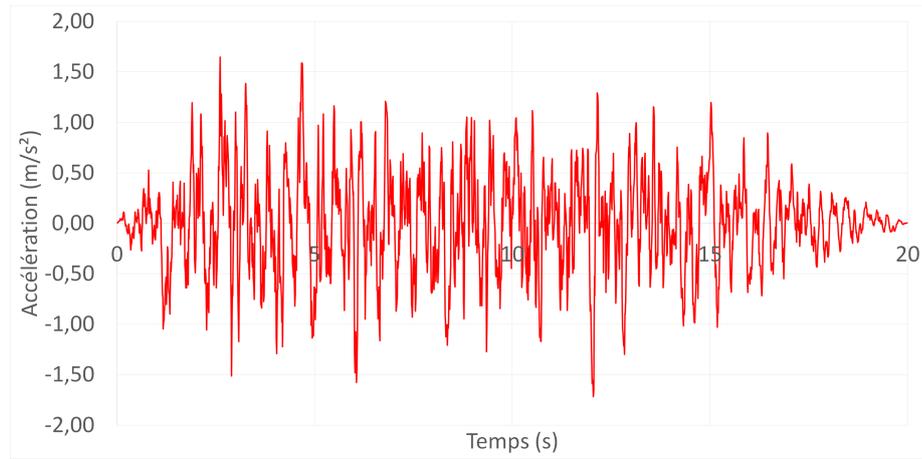
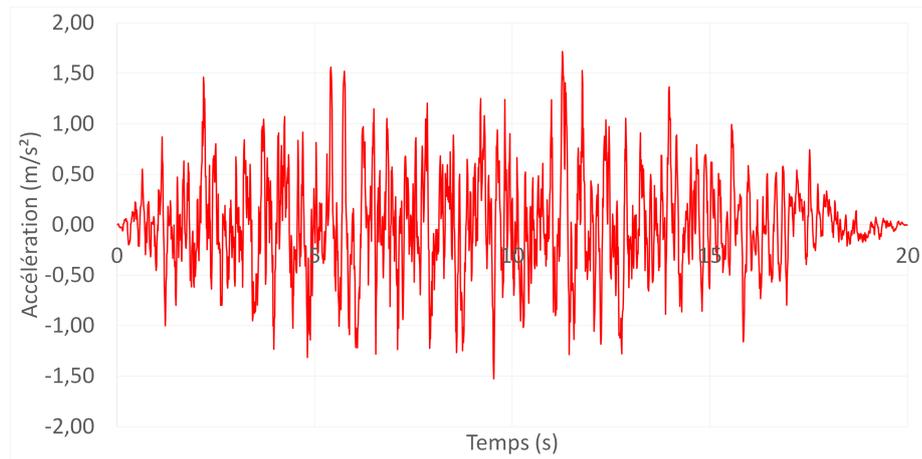
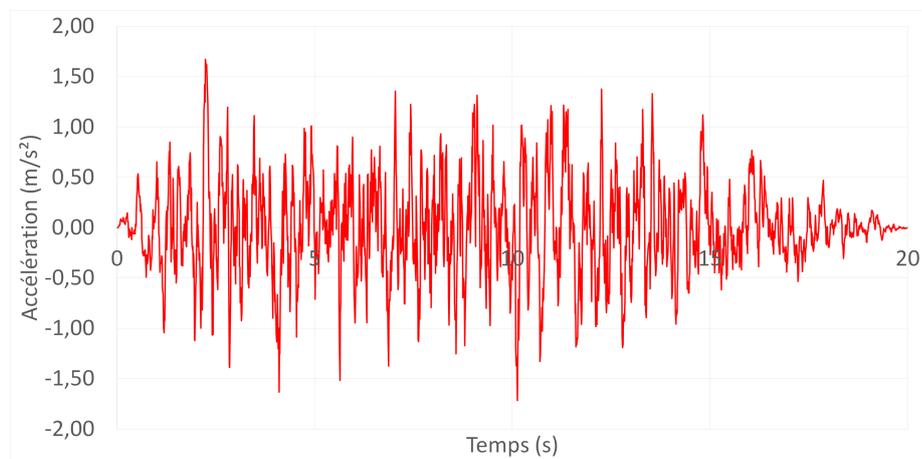
7-

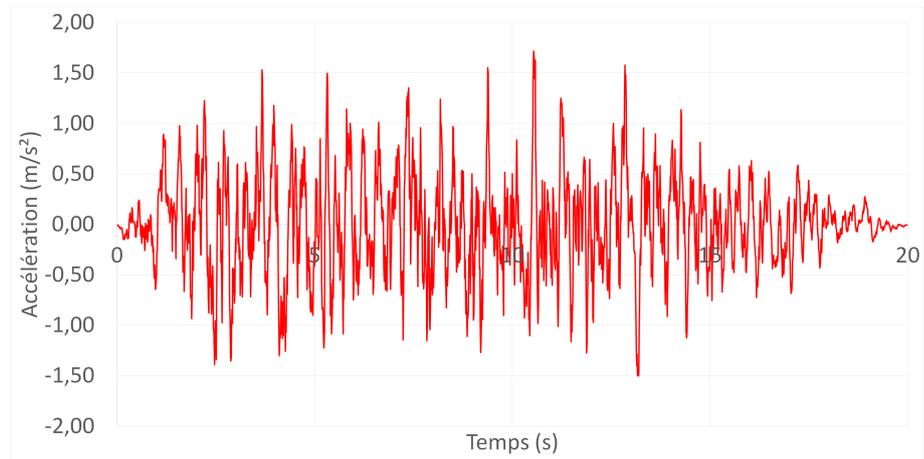
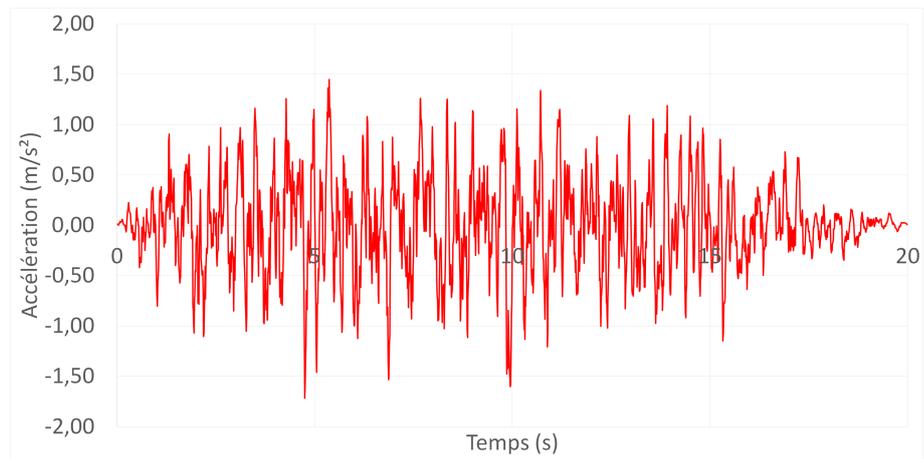
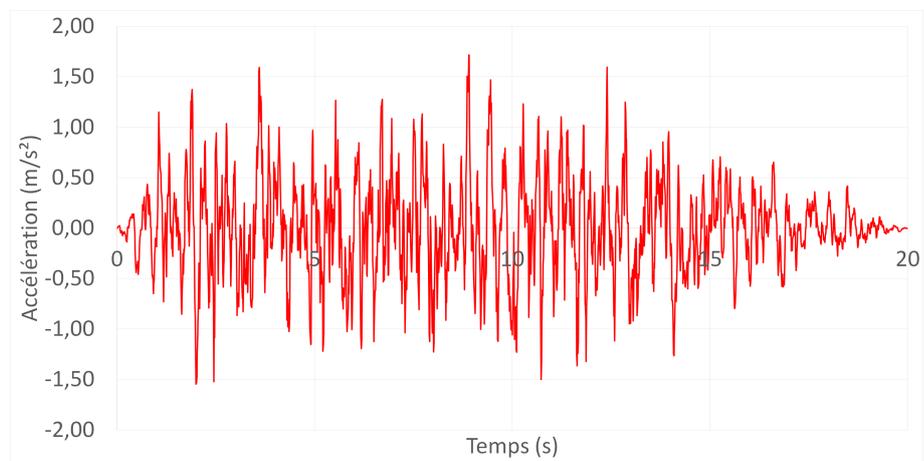


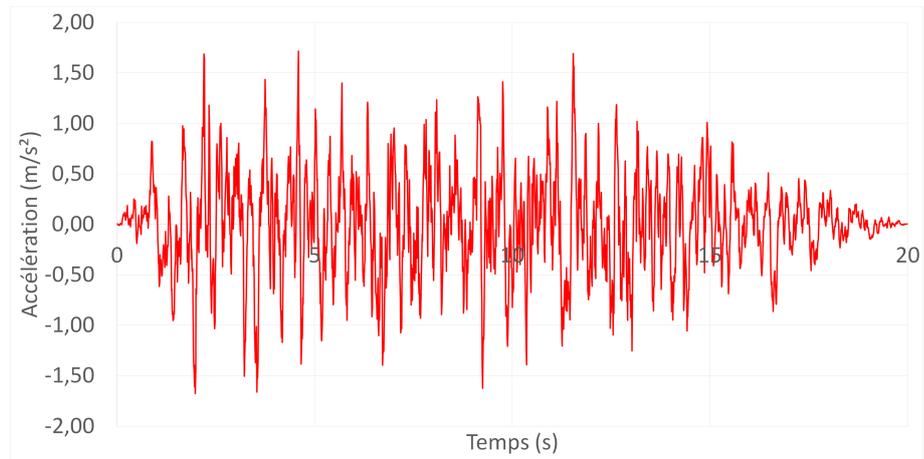
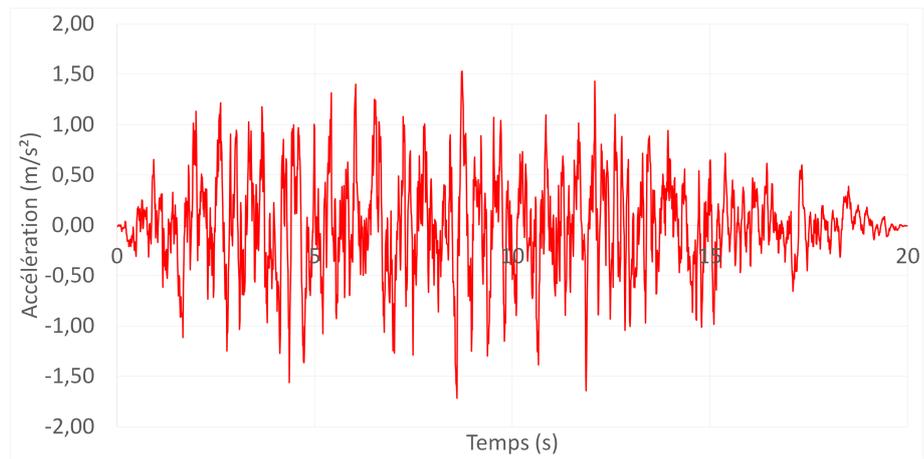
8-



**9-****10-****11-**

**12-****13-****14-**

**15-****16-****17-**

**18-****19-****20-**