

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية

الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

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

En : Travaux Publics

Spécialité : Voies et Ouvrages D'art

Par :

M<sup>lle</sup> MEDJAHDI Fatima Zohra

Mm SAHBATOU Zineb

Sujet

***ETUDE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES PONTS  
AVEC DES APPAREILS D'APPUIS À PENDULE À FRICTION***

Soutenu publiquement, le /06/2024, devant le jury composé de :

Pr. HAMDAOUI Karim

Université de Tlemcen

Président

Dr. BENYAKOUB Abdelhakim

Université de Tlemcen

Examineur

Pr. BOUMECHRA Nadir

Université de Tlemcen

Encadreur

Année universitaire :2023 / 2024

## **Remerciement**

*Tout d'abord, nous rendons grâce à Allah pour toutes les bénédictions accordées.*

*Nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance à nos parents, dont le dévouement et les sacrifices ont été la pierre angulaire de notre parcours.*

*Un immense merci à Monsieur **BOUMECHRA Nadir**, Professeur au Département de Génie Civil de l'Université d'Aboubekr Belkaïd à Tlemcen, pour son accompagnement, sa disponibilité constante, son précieux soutien et sa grande bienveillance tout au long de mon parcours et lors de la réalisation de ce mémoire. Ses conseils éclairés et son expertise ont été d'une aide inestimable. Nous nous sentons privilégiées d'avoir pu bénéficier de sa riche expérience et de son intelligence remarquable. Merci infiniment, Monsieur **BOUMECHRA Nadir**, pour votre dévouement et votre générosité.*

*Nous tenons également à exprimer nos plus vifs remerciements à Monsieur **HAMDAOUI Karim**, pour avoir accepté de présider le jury de cette soutenance, ainsi qu'à Monsieur **BENYAKOUB Abdelhakim** pour avoir accepté d'examiner cette thèse. Leur soutien et leur engagement ont été d'une importance capitale.*

*Enfin, notre sincère reconnaissance va à tous nos enseignants, depuis le primaire jusqu'aux études supérieures, qui nous ont accompagné et guidé tout au long de notre parcours académique.*

## ***Dédicaces***

*En premier lieu, nous tenons à exprimer notre gratitude envers Allah qui nous a accordé la vie et la santé nécessaires pour mener à bien ce modeste travail. À la fin de ce parcours, je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.*

*À la mémoire de mon père, **MEDJAHDI Abderrahmane***

*"اللهم ارحم ابي واعف عنه واسكنه فسيح جناتك"*

*À ma chère et tendre mère, **TENNOUGA Zoubida**. C'est grâce à elle que j'ai pu achever mes études. Je t'aime, maman.*

*À **M. BOUMECHRA Nadir**, notre encadrant qui nous a formé avec son expérience et qui nous a guidé tout au long de ce mémoire. Je lui adresse mes sincères remerciements pour sa patience.*

*À mes très chers frères et sœurs **Hanane, Karima, Chahinez, Med, Rabah et Aicha**.*

*A mon très cher **Chawki**, ma source d'amour, que je remercie sincèrement pour l'immense aide qu'il m'a apporté.*

*À tous mes amis **Chahinez Fadila, Fatima, Meriem**.*

*À mes collègues*

*À mon binôme **SAHBATOU Zineb**.*

*À tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

***MEDJAHDI Fatima Zohra.***

## *Dédicaces*

*Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu, le généreux, le tout puissant qui nous a donnés la force, le Courage, et la volonté pour réaliser ce modeste travail*

*À ma chère « mère », ma source d'inspiration infinie et ma belle étoile dans les moments sombres, qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie*

*À mon chère « père » qui a sacrifié toute sa vie afin de me*

*Voir devenir ce que je suis.*

*Que dieu vous garde pour nous. Merci du fond du cœur.*

*À M. BOUMECHRA Nadir, notre encadrant qui nous a formé avec son expérience et qui nous a guidé tout au long de ce mémoire.*

*À Mes chères frères et sœurs ; FARID, OMAR, KARIMA et FATIMA*

*Merci pour votre soutien indéfectible.*

*À mon mari MOHAMED, qui m'encourage sans cesse à poursuivre et à terminer mes études. Ton soutien constant, ton amour et ta patience m'on permit de surmonter chaque défi. Merci pour tout.*

*À ma jolie petite princesse NOUR DJIHENE, dont les sourire et la joie de vivre m'apportent une motivation supplémentaire chaque jour.*

*À mes chères cousines SOUMIA et SARA merci pour vos soutiens.*

*A une belle-sœur exceptionnelle CHAHINEZ merci d'être une part si spéciale de notre famille.*

*À ma chère nièce SANAA et mes chères neveux BASSEM et ISLAM.*

*À mes amies ; SOUMIA, FADELA, FATIMA ZOHRA, FAIZA, SARAH.*

*À Toute la famille et ma belle-famille.*

*À mes collègues.*

*À tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

## *Résumé*

Les séismes représentent une menace majeure pour les ponts, mettant en péril leur intégrité structurelle et la sécurité des infrastructures et des usagers. Pour renforcer la résilience des ponts face aux séismes, des approches innovantes telles que l'isolation sismique, notamment les appareils d'appuis à pendule à friction (FPS), ont été développées. Ces dispositifs permettent un glissement contrôlé entre la superstructure du pont et l'infrastructure, dissipant ainsi l'énergie sismique et réduisant les forces transmises à la structure. Les FPS offrent une capacité de dissipation d'énergie élevée et permettent un recentrage automatique après un séisme, limitant les déplacements permanents. Les curseurs courbes, une composante des systèmes d'isolation sismique, sont particulièrement efficaces, grâce à leur capacité à fonctionner comme un système d'isolation en eux-mêmes et à dissiper une grande quantité d'énergie grâce à leur mouvement pendulaire et au frottement entre les surfaces. En combinant ces mécanismes, les FPS contribuent à améliorer significativement la performance sismique des ponts, réduisant ainsi les dommages et assurant la sécurité des infrastructures.

## الملخص

تشكل الزلازل تهديداً كبيراً للجسور، معرضة لتهديد سلامتها الهيكلية وسلامة البنية التحتية والمستخدمين. ولتعزيز مرونة الجسور ضد الزلازل، تم تطوير مقاربات مبتكرة مثل العزل الزلزالي. تسمح هذه الأجهزة بالانزلاق المتحكم فيه بين هيكل الجسر وأساسه، مما يؤدي إلى تبديد الطاقة الزلزالية وتقليل القوى المنتقلة إلى الهيكل. توفر الأجهزة قدرة عالية على تبديد الطاقة وتمكين الإعادة التلقائية للمركز بعد الزلزال، مما يقلل من التحركات الدائمة. الانزلاق المنحني، كمكون لأنظمة العزل الزلزالي، فعال للغاية بسبب قدرته على العمل كنظام عزل في حد ذاته وتبديد كمية كبيرة من الطاقة من خلال حركته المعلقة والاحتكاك بين الأسطح. من خلال دمج هذه الآليات، يتم تحسين أداء الجسور ضد الزلازل بشكل كبير، مما يقلل من الأضرار ويضمن سلامة البنية التحتية.

## *Abstract*

Earthquakes pose a significant threat to bridges, risking their structural integrity and the safety of infrastructure and users. To enhance bridge resilience against earthquakes, innovative approaches such as seismic isolation, notably Friction Pendulum Systems (FPS) have been developed. These devices allow controlled sliding between the bridge superstructure and its supports, thereby dissipating seismic energy and reducing forces transmitted to the structure. The FPS provide high energy dissipation capacity and enable automatic recentering after an earthquake then limiting permanent displacements. Curved sliders, a component of seismic isolation systems, are particularly effective due to their ability to function as an isolation system themselves and dissipate a large amount of energy through their pendulum motion and friction between surfaces. By combining these mechanisms, the FPS significantly improve the seismic performance of bridges, thereby reducing damage and ensuring infrastructure safety.

# Sommaire

<b>Chapitre I. Revue de littérature.....</b>	<b>17</b>
<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>17</b>
<b>I.2 Comportement des Ponts lors de Séismes .....</b>	<b>17</b>
I.2.1 Analyse des Risques Associés aux Ponts lors des Séismes.....	18
I.2.1.1 Risques liés au sol de fondation .....	18
I.2.1.2 Dommages liés à l'infrastructure du pont : .....	18
I.2.1.3 Risques liés à la configuration du pont :.....	19
I.2.1.4 Dommages liés aux déplacements des tabliers et des appuis : .....	19
<b>I.3 Conception Parasismique.....</b>	<b>19</b>
I.3.1 Approche conventionnelle.....	20
I.3.2 L'isolation parasismique.....	21
I.3.2.1 Objectif .....	21
I.3.2.2 Principe .....	21
I.3.2.3 Avantages.....	22
<b>I.4 Méthodes du contrôle sismique des ponts .....</b>	<b>23</b>
<b>I.5 Théorie de l'isolation à la base .....</b>	<b>24</b>
I.5.1 Principes fondamentaux .....	24
I.5.2 Effet de la période sur la force sismique .....	25
I.5.3 Composantes des systèmes d'isolation à la base.....	25
I.5.3.1 Appui à faible rigidité horizontale.....	25
I.5.3.2 Mécanisme de dissipation d'énergie .....	26
I.5.3.3 Système de retenue .....	26
<b>I.6 Dispositifs parasismiques pour les ponts .....</b>	<b>26</b>
I.6.1 Isolateurs en Élastomère Fretté à Amortissement Élevé (HDRB) .....	27
I.6.2 Isolateurs en Élastomère Fretté avec Noyau de Plomb (LRB).....	27
I.6.3 Isolateurs à pendule à friction (FPS).....	28
I.6.4 Amortisseurs visqueux .....	28
<b>I.7 Généralité sur l'isolateur sismique pendule à friction.....</b>	<b>29</b>
I.7.1 Historique .....	29
I.7.2 Avantages .....	30
I.7.3 Évolution des systèmes pendule à friction et innovations récentes.....	30
<b>I.8 Conclusion .....</b>	<b>31</b>
<b>Chapitre II. Comportement mécanique et dynamique des appareils d'appuis à pendule à friction .....</b>	<b>32</b>
<b>II.1 Introduction.....</b>	<b>32</b>
<b>II.2 Dispositifs de pendule de friction (FPS) .....</b>	<b>32</b>
II.2.1 Principe de fonctionnement.....	33
II.2.2 Matériaux des surfaces de glissement .....	34
II.2.3 Rôle fondamental .....	34
<b>II.3 Types de dispositifs FPS .....</b>	<b>34</b>

<b>II.4</b>	<b>Dissipation d'énergie et Contrôle Structurel dans les Dispositifs de Pendule à Friction (FPS).....</b>	<b>35</b>
<b>II.5</b>	<b>Comportement dynamique et mécanique d'un dispositif FPS.....</b>	<b>36</b>
II.5.1	Analyse Mécanique .....	36
II.5.2	Comparaison du Comportement Dynamique des Dispositifs de Glissement avec Surface Plate et Sphérique .....	37
II.5.3	Analyse de l'hystérésis .....	38
II.5.4	Analyse Dynamique des Pendules à Friction.....	38
<b>II.6</b>	<b>La Rotation des appareils d'appuis à pendule de friction .....</b>	<b>42</b>
<b>II.7</b>	<b>Coefficients de Frottement dans les Dispositifs d'Appui à Pendule à Friction ..</b>	<b>43</b>
II.7.1	Coefficient de Frottement Statique et Dynamique .....	43
II.7.2	Dépendance aux Conditions de Contact.....	43
II.7.3	Impact sur les Performances Sismiques .....	44
II.7.4	Évaluation Expérimentale .....	44
II.7.5	Les Facteurs Impactant le Coefficients de Frottement dans les dispositifs FPS ..	44
<b>II.8</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>45</b>
<b>Chapitre III.</b>	<b>Etude d'un pont utilisant le procédé d'appareil d'appuis à pendule à friction.....</b>	<b>46</b>
<b>III.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>46</b>
<b>III.2</b>	<b>Présentation de l'ouvrage.....</b>	<b>46</b>
III.2.1	Schématisations des trains de charge .....	48
III.2.1.1	Modèle de charge UIC71 .....	48
III.2.1.2	Modèle de charge SW/2.....	48
<b>III.3</b>	<b>Définition des paramètres sismique de l'ouvrage .....</b>	<b>48</b>
III.3.1	Accélérogramme généré par le spectre de repense .....	50
III.3.2	Les méthodes d'analyse .....	51
III.3.2.1	La méthode modale spectrale.....	51
III.3.2.2	La méthode temporelle non linéaire.....	51
<b>III.4</b>	<b>Modélisation en éléments finis .....</b>	<b>51</b>
III.4.1	Evaluation des charges .....	51
III.4.2	Masse.....	51
III.4.3	Température.....	52
III.4.4	Modélisation des appareils d'appuis .....	52
<b>III.5</b>	<b>Définition des caractéristiques des appareils d'appuis en néoprène fretté.....</b>	<b>52</b>
<b>III.6</b>	<b>Définition des caractéristiques de l'isolateur à pendule à friction .....</b>	<b>53</b>
<b>III.7</b>	<b>Les combinaisons de composantes de l'action sismique :.....</b>	<b>55</b>
<b>III.8</b>	<b>Programme de l'étude .....</b>	<b>56</b>
<b>III.9</b>	<b>Les résultats du comportement.....</b>	<b>56</b>
III.9.1	Modes propres et période .....	56
III.9.2	Déplacements .....	58
III.9.3	Sollicitations.....	59
III.9.4	Énergie absorbée et dissipée.....	61

<b>III.10</b>	<b>Synthèse de résultats</b> .....	<b>63</b>
<b>III.11</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>63</b>
<b>Chapitre IV.</b>	<b>Etude paramétrique</b> .....	<b>65</b>
<b>IV.1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>65</b>
<b>IV.2</b>	<b>Méthodologie de l'étude paramétrique</b> .....	<b>65</b>
<b>IV.3</b>	<b>Résultats de l'analyse paramétrique</b> .....	<b>66</b>
IV.3.1	Combinaison ELAE (méthode modale spectrale).....	66
IV.3.1.1	Variation de coefficient de frottement.....	66
IV.3.1.2	Variation de Rayon de la surface de glissement.....	72
IV.3.2	Combinaison ELAS (méthode temporelle) .....	76
IV.3.2.1	Variation de coefficient de frottement.....	76
IV.3.2.2	Variation de Rayon de la surface de glissement.....	81
<b>IV.4</b>	<b>Synthèse des études paramétriques</b> .....	<b>86</b>
IV.4.1	Effet du coefficient de frottement ( $\mu$ ) sur les déplacements et les charges maximales .....	86
IV.4.2	Effet du rayon de la surface de glissement (R) sur les déplacements et les charges maximales .....	87
IV.4.3	Effet combiné du coefficient de frottement et du rayon de la surface de glissement .....	87
IV.4.4	Effet sur les efforts tranchants et les moments.....	87
IV.4.5	Les valeurs optimales .....	87
<b>IV.5</b>	<b>Conclusion Générale</b> .....	<b>88</b>

## *Liste des figures*

<b>Figure I-1</b> : Effondrement d'un viaduc pendant le séisme de Kobe en 1995, causé par la liquéfaction du sol [2].	18
<b>Figure I-2</b> : Flambement d'une pile de pont lors du séisme [11].	18
<b>Figure I-3</b> : Déplacement latéral du tablier du pont et la chute des supports sur la palée d'un pilier lors du séisme de Kobe en 1995[2].	19
<b>Figure I-4</b> : Comportement hystérétique d'un pont lors d'un séisme [11].	20
<b>Figure I-5</b> : Réponse spectrale d'un pont conventionnel et d'un pont isolé [1].	21
<b>Figure I-6</b> : Comparaison d'un pont conventionnel et d'un pont isolé [13].	21
<b>Figure I-7</b> : Illustration des principes d'allongement de la période et d'augmentation de l'isolation sismique [6].	22
<b>Figure I-8</b> : Méthodes de contrôle sismique des ponts [2].	23
<b>Figure I-9</b> : principe dynamique de l'isolation à la base [5].	24
<b>Figure I-10</b> : L'influence de la période sur l'intensité des forces sismiques et les déplacements maximums [4].	25
<b>Figure I-11</b> : Caractéristiques des isolateurs sismiques pour les ponts.	26
<b>Figure I-13</b> : Isolateurs en élastomère fretté à Amortissement Élevé (HDRB) [13].	27
<b>Figure I-14</b> : Isolateurs en élastomère fretté avec noyau de plomb (LRB) [13]	27
<b>Figure I-15</b> : Isolateurs à pendule de friction (FPS) [7].	28
<b>Figure I-16</b> : Amortisseurs visqueux [9].	29
<b>Figure I-17</b> : Isolateur à pendule à friction en cours d'installation sur le pont Benecia-Martinez, Californie [13].	29
<b>Figure II-1</b> : Assemblage des différents éléments d'un pendule à friction [7].	32
<b>Figure II-2</b> : Illustration des composantes du dispositif de pendule à friction [7].	33
<b>Figure II-3</b> : Principe de fonctionnement et loi de comportement [14].	33
<b>Figure II-4</b> : Types de dispositifs FPS.	34
<b>Figure II-5</b> : Illustration de la dissipation d'énergie	35
<b>Figure II-6</b> : Le modèle mécanique de FPS [11].	36
<b>Figure II-7</b> : Comportement Dynamique des Dispositifs de Glissement avec (a) Surface Plane et (b) Sphérique [11].	37
<b>Figure II-8</b> : Courbe hystérétique type d'un appareil d'appui à friction à pendule	38
<b>Figure II-9</b> : Illustration du comportement mécanique et les différents paramètres de FPS [7].	38
<b>Figure II-10</b> : Comportement hystérétique idéalisé force /déplacement d'un isolateur à pendule à friction.	39
<b>Figure II-11</b> : Principe de rotation des FPS.	42
<b>Figure II-12</b> : Surface sphérique du FPS après rotation.	43
<b>Figure II-13</b> : Variation de coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement pour différentes températures	45
<b>Figure III-1</b> : Vue en plan et évaluation longitudinale du projet	46
<b>Figure III-2</b> : Profile en travers de l'ouvrage	47
<b>Figure III-3</b> : Profile en long de l'ouvrage	47
<b>Figure III-4</b> : schématisation des piles	47
<b>Figure III-5</b> : Schéma de charges UIC71	48
<b>Figure III-6</b> : Schéma de charge SW2	48
<b>Figure III-7</b> : Spectre de réponse élastique composante Verticale et horizontale générée par les paramètres sismique de l'ouvrage.	49

<b>Figure III-8:</b> Spectre de repense horizontale .....	49
<b>Figure III-9 :</b> Spectre de dimensionnement .....	49
<b>Figure III-10 :</b> spectre de repense verticale .....	50
<b>Figure III-11:</b> L'accélérogramme Horizontale généré par le spectre de repense .....	50
<b>Figure III-12:</b> L'accélérogramme Verticale généré par le spectre de repense.....	50
<b>Figure III-13:</b> Caractéristiques des appareils d'appuis en néoprène fretté.....	52
<b>Figure III-14:</b> Définition des paramètres de FPS dans les directions U1, U2 et U3 .....	53
<b>Figure III-15:</b> Caractéristiques de l'isolateur à pendule à friction en U2 et U3.....	54
<b>Figure III-16 :</b> Caractéristiques de l'isolateur à pendule à friction en U1.....	54
<b>Figure III-17:</b> Model finis en 3D .....	54
<b>Figure III-18 :</b> Mode propre 01 pour le model en FPS .....	57
<b>Figure III-19 :</b> Mode propre 02 pour le model en FPS.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure III-20 :</b> Mode propre 03 pour le model en FPS.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure III-21:</b> Mode propre 01 pour le model en appareil d'appuis en Néoprène fretté .....	57
<b>Figure III-22 :</b> Mode propre 02 pour le model en appareil d'appuis en Néoprène fretté .....	58
<b>Figure III-23 :</b> Mode propre 03 pour le model en appareil d'appuis en Néoprène fretté .....	58
<b>Figure III-24 :</b> La repense temporelle du déplacement suivant X avec le temps des deux modèles.....	58
<b>Figure III-25 :</b> La repense temporelle du déplacement suivant Y avec le temps des deux modèles.....	59
<b>Figure III-26 :</b> La repense temporelle de l'effort normal N avec le temps des deux modèles	59
<b>Figure III-27 :</b> La repense temporelle de l'effort tranchant V33 avec le temps des deux modèles.....	60
<b>Figure III-28 :</b> La repense temporelle de l'effort tranchant V22 avec le temps des deux modèles.....	60
<b>Figure III-29 :</b> La repense temporelle du moment M22 avec le temps des deux modèles.....	61
<b>Figure III-30 :</b> La repense temporelle du moment M33 avec le temps des deux modèles.....	61
<b>Figure III-31 :</b> l'énergie totale dus au séisme et l'énergie absorbé par l'amortissement de l'ouvrage.....	62
<b>Figure III-32 :</b> l'énergie totale dus au séisme dissipé l'énergie hystérétique .....	62
<b>Figure III-33 :</b> l'énergie hystérétique dissipé suivant $S_x$ et $S_y$ .....	63
<b>Figure IV-1 :</b> Variation du déplacement suivant X en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons.....	67
<b>Figure IV-2 :</b> Variation du déplacement suivant Y en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons.....	67
<b>Figure IV-3 :</b> Variation de l'effort normal $N_{max}$ en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons. ....	68
<b>Figure IV-4 :</b> Variation de l'effort tranchant $V_{22}$ en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons. ....	69
<b>Figure IV-5 :</b> Variation de l'effort tranchant $V_{33}$ en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons. ....	70
<b>Figure IV-6 :</b> Variation du moment $M_{33}$ en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons. ....	70
<b>Figure IV-7 :</b> Variation du moment $M_{22}$ en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons. ....	71
<b>Figure IV-8 :</b> Variation du déplacement suivant X en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	72
<b>Figure IV-9 :</b> Variation du déplacement suivant Y en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	72

<b>Figure IV-10</b> : Variation de l'effort normal $N_{max}$ en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	73
<b>Figure IV-11</b> : Variation de l'effort tranchant $V_{22}$ en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	74
<b>Figure IV-12</b> : Variation de l'effort tranchant $V_{33}$ en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	74
<b>Figure IV-13</b> : Variation du moment $M_{33}$ en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	75
<b>Figure IV-14</b> : Variation du moment $M_{22}$ en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	76
<b>Figure IV-15</b> : Variation du déplacement suivant $X$ en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons. ....	77
<b>Figure IV-16</b> : Variation du déplacement suivant $Y$ en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons. ....	77
<b>Figure IV-17</b> : Variation de l'effort normal $N_{max}$ en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons. ....	78
<b>Figure IV-18</b> : Variation de l'effort tranchant $V_{22}$ en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons. ....	79
<b>Figure IV-19</b> : Variation de l'effort tranchant $V_{33}$ en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons. ....	79
<b>Figure IV-20</b> : Variation du moment $M_{33}$ en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons. ....	80
<b>Figure IV-21</b> : Variation du moment $M_{22}$ en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons. ....	81
<b>Figure IV-22</b> : Variation du déplacement suivant $X$ en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	82
<b>Figure IV-23</b> : Variation du déplacement suivant $Y$ en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	82
<b>Figure IV-24</b> : Variation de l'effort normal $N_{max}$ en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	83
<b>Figure IV-25</b> : Variation de l'effort tranchant $V_{22}$ en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	84
<b>Figure IV-26</b> : Variation de l'effort tranchant $V_{33}$ en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	84
<b>Figure IV-27</b> : Variation du moment $M_{33}$ en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	85
<b>Figure IV-28</b> : Variation du moment $M_{22}$ en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement. ....	86
<b>Figure IV-29</b> : Variation temporelle du déplacement $\Delta x$ suivant le séisme $S_x$ . ....	88

## *Liste des notions principales*

**HDRB** : Isolateurs en élastomère fretté à amortissement élevé

**LRB** : Isolateurs en Élastomère Fretté avec Noyau de Plomb

**FPS** : Isolateurs à pendule de friction

**SI** : Isolateurs à pendule de friction avec une plaque coulissant plane

**SIP-S** : Isolateurs à pendule de friction avec une seule plaque coulissante concave (sphérique)

**SIP-D** : Isolateurs à pendule de friction avec plaque coulissante double concave

# *Introduction générale*

Les séismes représentent une menace majeure pour les infrastructures, en particulier les ponts, qui jouent un rôle vital dans la connectivité des réseaux de transport. Les tremblements de terre peuvent provoquer des dommages structurels graves, allant de fissures et déformations à l'effondrement complet, entraînant des perturbations significatives et des pertes économiques importantes. Dans ce contexte, l'amélioration de la résilience des ponts face aux séismes est devenue une priorité essentielle pour les ingénieurs et les décideurs.

Les techniques de protection sismique des ponts ont évolué au fil des décennies, avec des méthodes traditionnelles telles que le renforcement des matériaux et l'amélioration de la ductilité des structures. Toutefois, ces méthodes ne suffisent souvent pas à prévenir les dommages dans les zones sismiquement actives. C'est pourquoi des approches plus innovantes, telles que l'isolation sismique, ont été développées. Parmi ces solutions, les appareils d'appuis à pendule à friction (FPS - Friction Pendulum System) se sont révélés particulièrement prometteurs.

Les appareils d'appuis à pendule à friction fonctionnent en permettant un glissement contrôlé entre la superstructure et la sous structure du pont. Ce glissement dissipe l'énergie sismique, réduit les forces transmises à la structure et permet un recentrage automatique après le séisme, limitant ainsi les déplacements permanents. Les FPS sont conçus pour supporter de grandes déformations et offrir une capacité de dissipation d'énergie élevée, ce qui en fait une solution efficace pour améliorer la performance sismique des ponts.

Ce mémoire d'étude se concentre sur l'analyse approfondie du comportement dynamique des ponts équipés d'appareils d'appuis à pendule à friction (FPS). Il est divisé en quatre chapitres, chacun abordant des aspects spécifiques de la thématique :

1. **Revue de littérature** : Ce chapitre offre une exploration exhaustive du contexte général de l'isolation sismique en examinant la littérature existante sur divers aspects liés au comportement des ponts lors de séismes. Il englobe également les méthodes de conception parasismique, les dispositifs de contrôle sismique et les principes de fonctionnement des appareils d'appuis à pendule à friction.

2. **Comportement mécanique et dynamique des appareils d'appuis à pendule à friction** : Ce chapitre se consacre à l'analyse spécifique des aspects mécaniques et dynamiques des FPS. Il explore en détail leur principe de fonctionnement, leur rôle fondamental dans la

protection sismique des ponts, ainsi que leur comportement sous l'influence des charges sismiques.

3. **Étude d'un pont utilisant le procédé d'appareil d'appuis à pendule à friction** : Ce chapitre présente une étude de cas approfondie d'un pont équipé de FPS. Son objectif est de mettre en évidence la différence entre les isolateurs, notamment l'isolateur à pendule à friction, et un simple appareil d'appuis en néoprène fretté. Cette étude comprend une modélisation en éléments finis suivie d'une analyse numérique pour évaluer les performances dynamiques des dispositifs d'isolation sismique utilisés.

4. **Étude paramétrique** : Ce chapitre propose une analyse approfondie des paramètres influant sur le comportement sismique du pont. En se concentrant notamment sur les caractéristiques de l'appareil d'appui FPS tel que le coefficient de frottement et le rayon de la surface de glissement. Il vise à observer la variation des réponses sismiques de l'ouvrage par rapport à la variation des caractéristiques des appareils d'appuis et aussi à déterminer les valeurs optimales de ces paramètres pour améliorer la performance sismique du pont équipé de FPS.

**Conclusion** : Enfin, une synthèse des résultats obtenus tout au long de l'étude est exposée. Il met en lumière les conclusions importantes, discute des implications pratiques des résultats et propose des recommandations pour de futures recherches dans ce domaine.

À travers cette structure, ce manuscrit vise à offrir une analyse complète du comportement dynamique des ponts équipés d'appareils d'appuis à pendule à friction, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de leur efficacité et de leur utilisation dans la protection sismique des infrastructures.

# Chapitre I. Revue de littérature

## I.1 Introduction

Les ponts, en tant qu'éléments important des réseaux routiers et ferroviaires, sont particulièrement vulnérables aux séismes, ces événements naturels pouvant entraîner des dommages graves et mettre en péril la sécurité des infrastructures et des usagers. Comprendre le comportement des ponts lors de séismes et développer des stratégies efficaces pour renforcer leur résilience face à ces événements est donc une préoccupation majeure dans le domaine de l'ingénierie civile.

Ce chapitre propose une revue de la littérature sur le comportement des ponts lors de séismes et les différentes approches de conception parasismique utilisées pour minimiser les dommages et garantir la sécurité des structures. Nous explorerons les défis spécifiques posés par les séismes aux ponts, les types de dommages observés et les mécanismes sous-jacents, ainsi que les stratégies de conception et de contrôle sismique employées pour atténuer ces effets néfastes.

Nous débuterons par une analyse approfondie du comportement dynamique des ponts lors de séismes, mettant en évidence les facteurs qui contribuent à leur vulnérabilité et les schémas comportementaux caractéristiques observés. Ensuite, nous examinerons les risques associés aux ponts lors de séismes, en identifiant les différentes sources de dommages et les mécanismes responsables de leur occurrence.

Nous aborderons également les différentes approches de conception parasismique utilisées pour renforcer la résistance des ponts aux séismes, en mettant l'accent sur les méthodes conventionnelles de conception ductile et les approches innovantes basées sur l'isolation sismique. Nous discuterons des principes fondamentaux de l'isolation sismique à la base, des composantes des systèmes d'isolation et des dispositifs parasismiques utilisés dans la conception des ponts.

Enfin, nous nous penchons sur les appareils d'appui à pendule à friction, l'un des dispositifs les plus prometteurs dans le domaine de l'ingénierie parasismique des ponts. Ces dispositifs, caractérisés par leur capacité à dissiper efficacement l'énergie sismique et à réduire les forces transmises à la structure, offrent une solution novatrice pour renforcer la résilience des ponts aux séismes. Nous examinons leur fonctionnement, leur application historique, leur comportement non linéaire et leurs avantages dans la protection sismique des ponts.

## I.2 Comportement des Ponts lors de Séismes

Les séismes ont mis en évidence la vulnérabilité particulière des ponts au sein des réseaux routiers, les rendant les composants les plus susceptibles de subir des dommages sévères lors de ces événements. Cette vulnérabilité découle de la structure même des ponts, caractérisée par un tablier reposant sur plusieurs appuis de rigidités différentes. Cette configuration entraîne des oscillations désynchronisées des éléments porteurs en réponse aux mouvements rapides du sol, provoquant des déplacements des appuis du pont avec des variations périodiques de distance entre eux [1].

Les ponts peuvent osciller dans les directions verticale et horizontale, mais l'excitation horizontale est souvent plus préoccupante, engendrant des sollicitations bien plus importantes que les autres forces. Dans ce contexte, la vulnérabilité des ponts est généralement plus élevée dans le sens longitudinal que dans le sens transversal [2].

L'analyse des dommages sismiques survenus lors de séismes majeurs a permis d'identifier des schémas comportementaux caractéristiques, offrant des enseignements précieux pour renforcer la résistance des ponts aux tremblements de terre [2].

### **I.2.1 Analyse des Risques Associés aux Ponts lors des Séismes**

L'analyse montre que les risques de dommages peuvent être classés comme suit :

#### **I.2.1.1 Risques liés au sol de fondation**

Les observations post-sismiques ont souligné l'impact des conditions du site sur le comportement des ponts. Parmi les problèmes identifiés, on retrouve le risque de liquéfaction des sols et ses conséquences telles que la perte de résistance des couches, l'étalement latéral et le tassement post-sismique (Figure I-1) [2].



**Figure I-1** : Effondrement d'un viaduc pendant le séisme de Kobe en 1995, causé par la liquéfaction du sol [2].

#### **I.2.1.2 Dommages liés à l'infrastructure du pont :**

Les piles, en supportant en permanence les charges appliquées aux ponts, sont essentielles pour assurer le bon fonctionnement de l'ouvrage. Les risques auxquels elles sont exposées incluent les ruptures fragiles des éléments en raison du manque de ductilité ou de confinement du béton, notamment en raison d'une insuffisance des longueurs d'ancrage ou de recouvrement, ou du flambement des aciers longitudinaux (Figure I-2).



**Figure I-2**: Flambement d'une pile de pont lors du séisme [11].

### I.2.1.3 Risques liés à la configuration du pont :

Idéalement, les structures de ponts devraient être régulières ou symétriques pour dissiper efficacement l'énergie de déformation lors d'un séisme. Cependant, dans la réalité, la conception est souvent confrontée à des contraintes qui peuvent compromettre cette régularité.

### I.2.1.4 Dommages liés aux déplacements des tabliers et des appuis :

Le tablier, en raison de son propre poids et des charges maximale qu'il supporte, est sujet à des forces d'inertie pendant un séisme, entraînant des déplacements importants voire des échappements des appareils d'appui. Les déplacements des appuis, tels que les piles et les culées, ainsi que les déplacements différentiels non synchrones des têtes de piles, peuvent également entraîner une redistribution des charges sur les appuis, compromettant ainsi la sécurité de l'ouvrage (Figure I 3) [2].



**Figure I-3** : Déplacement latéral du tablier du pont et la chute des supports sur la palée d'un pilier lors du séisme de Kobe en 1995[2].

## I.3 Conception Parasismique

Le risque sismique représente la probabilité de dommages causés par un tremblement de terre à une structure, un système ou une entité spécifique. Il est influencé par le danger sismique, la vulnérabilité des structures et leur exposition aux séismes. Le danger sismique comprend des phénomènes tels que le mouvement du sol et la rupture de faille, tandis que la vulnérabilité dépend de la résistance des structures aux tremblements de terre. L'exposition représente le nombre d'actifs susceptibles d'être affectés par un séisme [1].

Gérer le risque sismique implique de réduire la probabilité de dommages et d'atténuer les conséquences des séismes. Cela peut être réalisé en atténuant le danger sismique, en réduisant la vulnérabilité des structures ou en limitant leur exposition aux séismes. La modélisation du risque sismique est complexe en raison de l'interaction dynamique entre le danger et la vulnérabilité dans le temps et l'espace. En comprenant pleinement les composantes du risque sismique, les décideurs peuvent prendre des mesures efficaces pour renforcer la résilience des infrastructures et réduire les pertes lors de futurs séismes [1].

La réalité de la vulnérabilité sismique de notre pays souligne l'impératif d'adopter diverses stratégies de conception pour faire face aux effets néfastes des mouvements sismiques et garantir la fonctionnalité des structures après des séismes majeurs. Deux approches principales se distinguent : les conceptions dites "ductiles", qui privilégient la résistance et la capacité de déformation inélastique, et les approches basées sur l'isolation sismique [1]. Ces deux philosophies présentent des coûts et des comportements différents en situation de séisme. Le choix entre ces approches revient au maître d'ouvrage, qui doit prendre en compte divers facteurs

tels que la sismicité régionale, la valeur de l'ouvrage et les considérations stratégiques pour opter en faveur de l'une ou l'autre.

### I.3.1 Approche conventionnelle

Dans l'approche conventionnelle de conception parasismique, l'objectif est de garantir à la structure et à sa fondation une résistance adéquate pour supporter les charges sismiques de manière sûre et rentable. Pour ce faire, les structures sont conçues de manière à permettre la dissipation de l'énergie induite par le séisme à travers des déformations inélastiques concentrées dans des zones spécifiques appelées rotules plastiques. Dans le cas des ponts, ces rotules plastiques se forment principalement dans les piles, en particulier dans les zones d'encastrement avec les semelles ou éventuellement avec le tablier du pont. Cela facilite l'accessibilité pour les inspections et les réparations ultérieures. En adoptant cette approche, la structure, y compris les éléments de fondation accessibles, est conçue pour résister à des niveaux de force sismique plusieurs fois inférieurs à ceux des charges élastiques. Cette stratégie permet de transformer la demande en force en une demande en ductilité, ce qui est plus économique à gérer. La réduction des forces élastiques est quantifiée par le coefficient de comportement "q", qui mesure la capacité de dissipation de l'énergie [9].

Les avantages de cette méthode résident dans sa capacité à réduire efficacement les sollicitations sismiques, ce qui permet de maîtriser les coûts grâce à la diminution des forces prises en compte dans le dimensionnement structurel. Cependant, cette approche n'est pas sans inconvénients. Par exemple, les structures encastrees peuvent être sujettes à des problèmes de résonance, où la fréquence naturelle de la structure coïncide avec les fréquences du séisme, entraînant une amplification du mouvement du sol et des dommages sévères. Pour atténuer ce risque, il est nécessaire d'ajuster la période propre de la structure en modifiant sa flexibilité ou sa rigidité. En utilisant la méthode conventionnelle, il est difficile de réduire à la fois les déplacements et les forces sismiques afin d'éviter les dommages [9].

L'application de cette méthode induit des dommages partiels à la structure en cas de séisme ce qui implique la nécessité de procéder à des réparations ultérieures, entraînant ainsi une augmentation significative du coût global de la construction. Par conséquent, cette approche se révèle peu avantageuse dans le contexte de la construction de ponts en zones sismiques, car elle accroît la fréquence des interventions sur l'ouvrage.

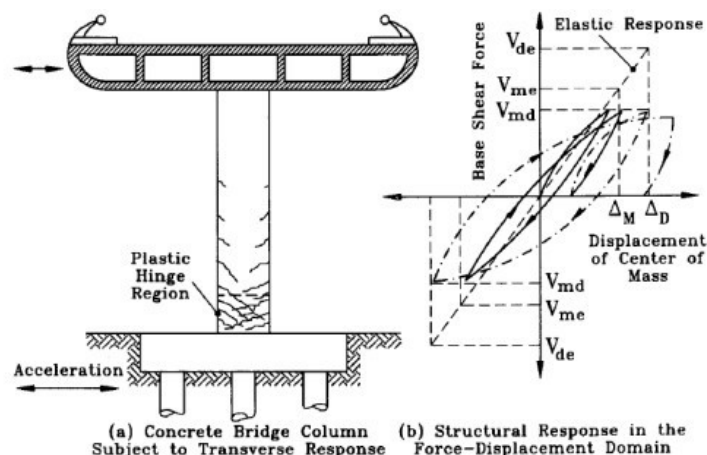


Figure I-4 : Comportement hystérique d'un pont lors d'un séisme [11].

## I.3.2 L'isolation parasismique

### I.3.2.1 Objectif

L'isolation sismique à la base a pour objectif de découpler le mouvement du sol de celui de la structure, afin de minimiser les forces qui lui sont transmises. En effet, les forces sismiques agissant sur une structure isolée sont généralement de 3 à 10 fois moins importantes que celles exercées sur une structure non isolée. Les isolateurs absorbent les déformations inélastiques et filtrent les accélérations à haute fréquence, ce qui permet à la superstructure isolée de se déplacer essentiellement comme un bloc rigide, avec des accélérations minimales et peu de déformations. Ainsi, les forces d'inertie transmises aux éléments de fondation demeurent en deçà de leur capacité élastique [1].

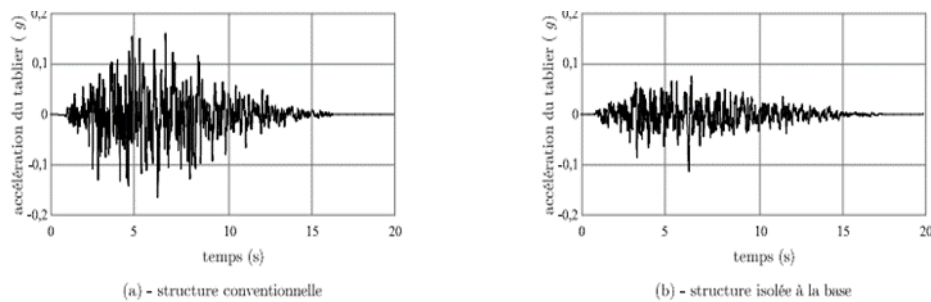


Figure I-5 : Réponse spectrale d'un pont conventionnel et d'un pont isolé à la base [1]

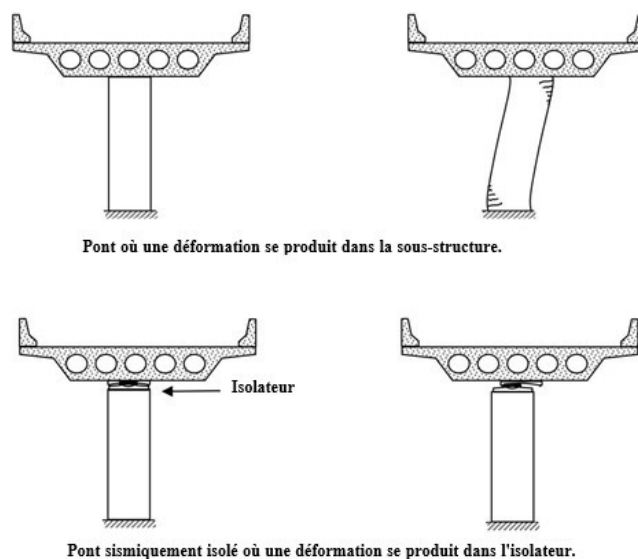


Figure I-6 : Comparaison d'un pont conventionnel et d'un pont isolé [13].

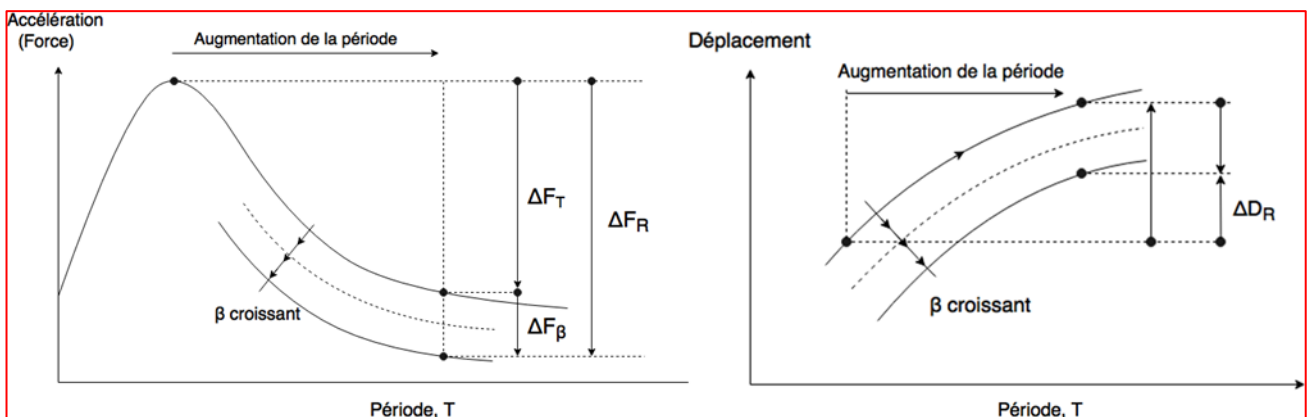
### I.3.2.2 Principe

Le principe de l'isolation parasismique pour les ponts vise à séparer le mouvement de la structure portée de celui de ses appuis, ce qui permet de réduire les forces transmises à la structure. Pour y parvenir, on augmente la flexibilité de la structure, ce qui allonge sa période de vibration. En parallèle, on fournit un amortissement approprié pour limiter les déplacements. En conséquence, si la période de vibration de la structure est suffisamment éloignée de celle du séisme prédominant, les forces transmises à la structure sont considérablement diminuées [13].

Les isolateurs utilisés dans cette méthode captent les déformations inélastiques et filtrent les accélérations à haute fréquence, ce qui permet à la superstructure isolée de se déplacer de manière rigide avec de faibles accélérations et peu de déformations. Ainsi, les forces d'inertie transmises aux éléments de fondations restent en dessous de leur capacité élastique [13].

Les isolateurs sont généralement installés à la base de la structure, entre le dessus des piles ou des culées et le tablier. Ils jouent un double rôle dans le comportement dynamique des structures en allongeant la période de vibration et en augmentant l'amortissement, ce qui permet d'absorber et de dissiper une partie importante de l'énergie sismique.

Le principe fondamental de l'isolation sismique consiste à modifier la réponse du pont en ajustant sa période de vibration de manière à ce qu'elle diffère de la période d'excitation prédominante du séisme. Cela permet de réduire les forces d'inertie transmises à la structure, mais cela peut entraîner des déplacements importants, notamment dans le cas des structures légères. Pour contrôler ces déplacements, on peut ajouter des amortisseurs aux appuis parasismiques, ce qui permet de trouver un compromis entre la réduction des forces et l'augmentation des déplacements [6].



**Figure I-7** : Illustration des principes d'allongement de la période et d'augmentation de l'isolation sismique [6].

### I.3.2.3 Avantages

Les techniques d'isolation sismique offrent tout d'abord la possibilité de réduire considérablement les forces sismiques exercées sur les structures, pouvant aller jusqu'à 3 à 10 fois moins que celles subies par une structure non isolée. Elles représentent ainsi un système efficace pour protéger aussi bien les nouvelles structures que celles existantes contre les séismes. Grâce aux isolateurs parasismiques, il est possible d'atteindre un niveau de protection potentiellement élevé pour les ponts par rapport aux méthodes conventionnelles, tout en réalisant des économies sur les coûts du projet [11].

Par ailleurs, les avantages financiers de l'isolation sismique se manifestent également à long terme, car elle permet de maintenir la fonctionnalité de la structure après un séisme, évitant ainsi les coûts de reconstruction. Cette caractéristique est particulièrement cruciale pour les ponts considérés comme des infrastructures de secours, qui doivent demeurer opérationnels même après un événement sismique.

En outre, les isolateurs sismiques peuvent être entretenus et remplacés à tout moment, ce qui permet à la structure de rester dans une plage élastique, réduisant significativement l'énergie transmise par le mouvement du sol. Ainsi, l'isolation sismique offre des avantages à la fois en termes de coût de construction et de préservation de la fonctionnalité des ponts après un séisme.

## I.4 Méthodes du contrôle sismique des ponts

La protection sismique des structures vise à limiter les dommages causés par l'énergie transmise lors d'un séisme. On distingue deux grandes catégories de méthodes de contrôle sismique pour réduire les dommages structurels. Les méthodes fréquentielles ajustent les fréquences de vibration de la structure pour les éloigner des fréquences prédominantes du séisme, avec ou sans dissipation d'énergie supplémentaire. Les méthodes non fréquentielles reposent uniquement sur la dissipation d'énergie dans des éléments dédiés. Ces deux catégories comprennent des méthodes de contrôle actives, passives, semi-actives et hybrides.

Les méthodes actives impliquent l'utilisation d'une source externe d'énergie et d'une boucle de contrôle pour ajuster en temps réel les propriétés mécaniques du système en fonction de l'excitation provoquée par le séisme, visant ainsi à réduire la demande sur les éléments structuraux. Les systèmes passifs, quant à eux, ont des propriétés mécaniques fixées après l'installation. Les systèmes semi-actifs sont une variante des systèmes passifs, avec des propriétés mécaniques ajustables en temps réel à l'aide d'une faible source énergétique, si disponible. Les systèmes hybrides résultent de l'association de systèmes actifs, passifs et semi-actifs. Bien que les systèmes actifs offrent un meilleur contrôle de la réponse de la structure, ils nécessitent un suivi et un entretien plus importants que les systèmes passifs qui ne requièrent aucune source d'énergie externe [2].

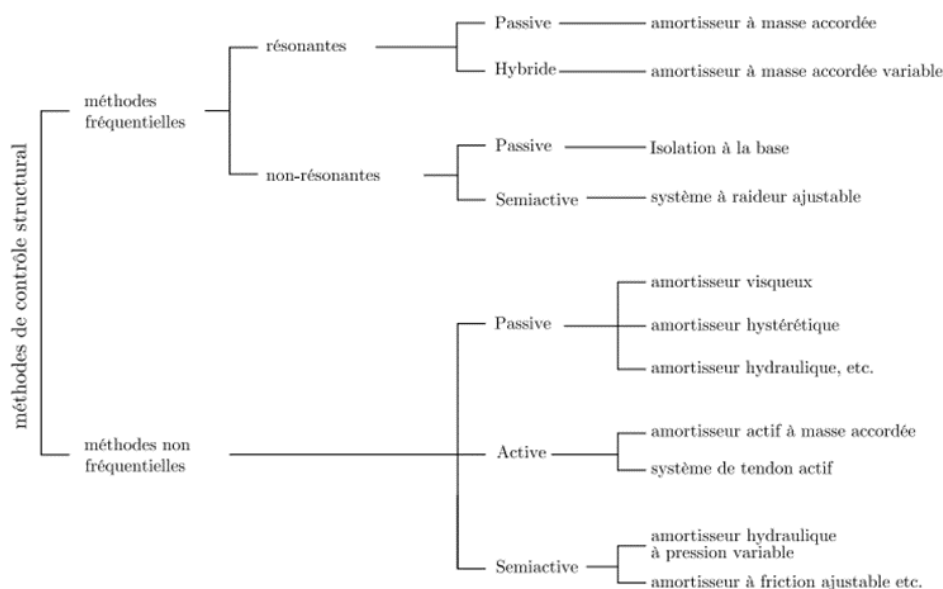


Figure I-8 : Méthodes de contrôle sismique des ponts [2].

Parmi les méthodes de contrôle illustrées, la méthode d'isolation à la base est la plus couramment utilisée dans les ouvrages d'art. Cela s'explique par sa facilité d'intégration et le fait que les isolateurs présentent une configuration similaire à celle des composants déjà existants dans les structures conventionnelles, tels que les appareils d'appui. Cette méthode offre une solution efficace pour minimiser les dommages sismiques en isolant la structure des mouvements du sol, contribuant ainsi à améliorer la résilience des ouvrages d'art face aux tremblements de terre [2].

## I.5 Théorie de l'isolation à la base

### I.5.1 Principes fondamentaux

L'isolation sismique vise à modifier les propriétés dynamiques d'une structure pour réduire les efforts et les déformations dans ses principaux éléments structuraux en cas de séisme. Ce processus implique généralement des changements dans les trois propriétés principales qui déterminent la réponse dynamique de la structure : la rigidité, la masse et l'amortissement [5].

Dans le cas de l'isolation sismique à la base, l'objectif est de concentrer les déplacements pendant un séisme dans des éléments flexibles appelés isolateurs. Cela a pour effet de réduire ou d'annuler la demande de ductilité pour les principaux éléments structuraux. La flexibilité des isolateurs permet également de découpler le mouvement du sol de celui de la structure, réduisant ainsi la transmission d'énergie à la structure et diminuant les efforts et les déformations internes.

En pratique, on utilise souvent la diminution de la rigidité et l'augmentation de l'amortissement pour isoler une structure à la base. Cela permet de concentrer la demande de ductilité et de dissipation d'énergie dans un seul élément, l'isolateur sismique, qui peut être facilement remplacé en cas de besoin.

Trois concepts de dimensionnement parasismique sont illustrés dans la Figure I-9. Le

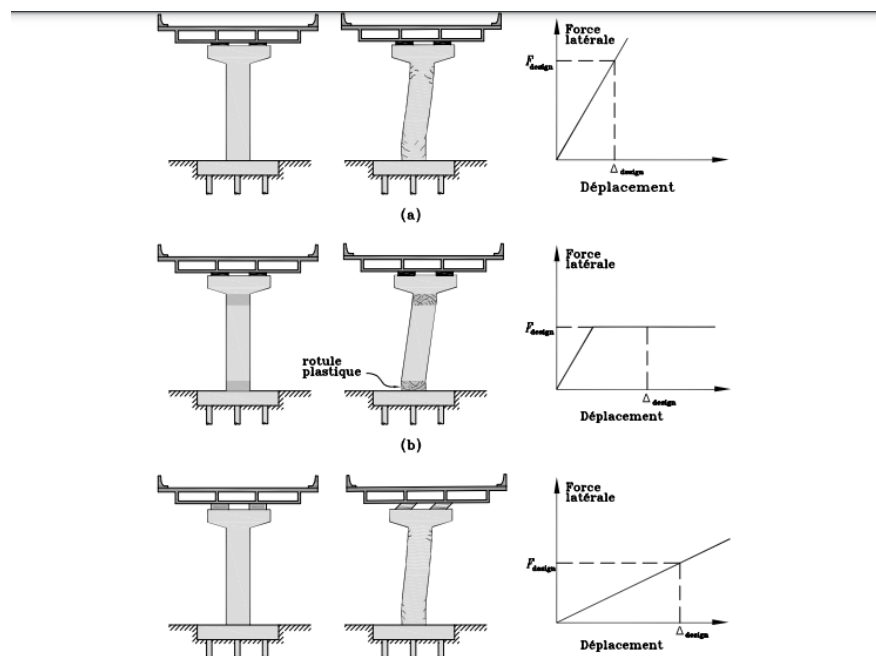


Figure I-9 : principe dynamique de l'isolation à la base [5].

dimensionnement élastique (Figure I-9 a) vise à ce que la structure reste élastique (sans déformation permanente) pendant un séisme, minimisant ainsi les dommages. Le dimensionnement ductile (Figure I-9 b) permet à certaines parties de la structure d'exhiber un comportement ductile pour dissiper l'énergie sismique, acceptant un certain niveau

d'endommagement après le séisme. Enfin, le dimensionnement par isolation sismique à la base (Figure I-9 c) concentre les déplacements dans le système d'isolation, réduisant la demande sur la structure principale et maintenant l'ouvrage élastique et opérationnel après le séisme. Cependant, il convient de noter que l'isolation sismique peut entraîner de grands déplacements, et l'ouvrage doit être conçu pour les accommoder sans risque d'instabilité structurale. L'ajout d'amortissement peut contribuer à réduire ces déplacements [5].

### I.5.2 Effet de la période sur la force sismique

Pour des faibles valeurs d'amortissement, le facteur de transmission entre le mouvement d'un sol de fondation et une structure fixe peut être approximé par l'équation (1-1) :

$$TR = \left[ \left( \frac{f_{sol}}{f_{str}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (1-1)$$

Où  $f_{str}$  et  $f_{sol}$  représentent les fréquences naturelles de la structure et du sol de fondation, respectivement. Pour la plupart des sols, les périodes prédominantes des ondes sismiques sont basses, généralement en dessous de 2 secondes. Par conséquent, les structures ayant des périodes propres courtes sont beaucoup plus vulnérables que celles ayant des périodes plus longues.

La figure (Figure I-10 b) représente un spectre de réponse typique à un tremblement de terre pour un système à un degré de liberté. Comme indiqué, l'intensité des forces sismiques (proportionnelle à l'intensité de l'accélération) diminue avec l'augmentation de la période. Ainsi, l'allongement de la période propre de la structure, réalisé en introduisant de la flexibilité, constitue une méthode efficace pour réduire la demande sismique sur une structure. Cependant, cette augmentation de la flexibilité entraîne une amplification des déplacements dans la structure, comme montré par le spectre de réponse en déplacement (Figure I-10 a) [4].

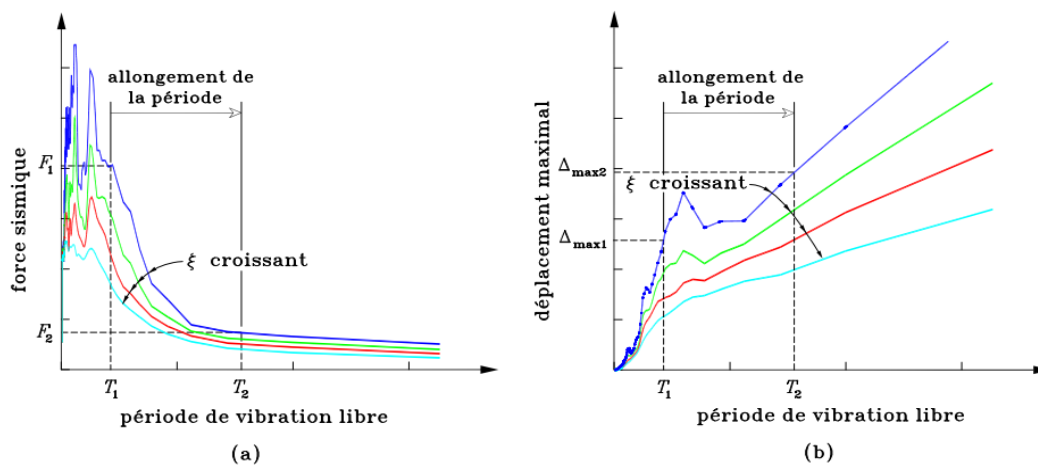


Figure I-10 : L'influence de la période sur l'intensité des forces sismiques et les déplacements maximums [4].

### I.5.3 Composantes des systèmes d'isolation à la base

Les systèmes d'isolation sismique à la base sont composés de trois éléments principaux :

#### I.5.3.1 Appui à faible rigidité horizontale

Cette composante, souvent le noyau de l'isolateur, est conçue pour transmettre efficacement les charges verticales tout en offrant une faible rigidité horizontale. La rigidité latérale de l'appui est essentielle pour augmenter la période de vibration de la structure, conduisant ainsi à une

réduction significative des forces sismiques. Elle joue également un rôle important dans le déplacement sismique de l'ouvrage et son recentrage après un séisme.

### I.5.3.2 Mécanisme de dissipation d'énergie

Ce mécanisme, intégré directement à l'appui ou installé en parallèle, a pour objectif principal de contrôler la déformation de l'isolateur et, par conséquent, le déplacement absolu de la superstructure.

- Les amortisseurs hydrauliques
- Les amortisseurs à base de friction (comportement plastique ou élasto-plastique)
- Les amortisseurs à base de comportement hystérésis, élastomères à haut taux d'amortissement
- Cependant, certains types d'amortisseurs peuvent transmettre les accélérations des modes supérieurs à la structure.

### I.5.3.3 Système de retenue

Le système d'isolation doit initialement posséder une rigidité élevée pour minimiser les déplacements sous des charges de service telles que le freinage et le vent. Dans certains cas, l'incorporation d'un mécanisme de retenue sacrificiel (fuse) est nécessaire, définissant des résistances minimale et maximale soigneusement établies pour assurer une performance optimale du système.

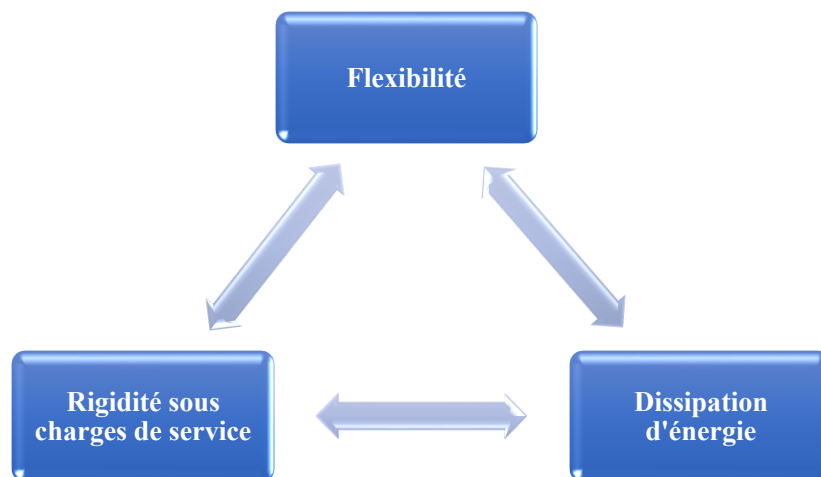


Figure I-11 : Caractéristiques des isolateurs sismiques pour les ponts.

## I.6 Dispositifs parasismiques pour les ponts

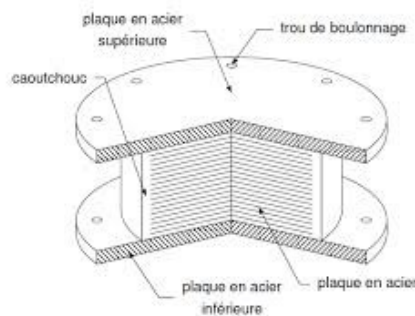
Les dispositifs de contrôle sismique visent à désynchroniser la fréquence de vibration de la structure à amortir de celle de l'excitation sismique, limitant ainsi son effet. Ils se répartissent en trois catégories : passifs, actifs et semi-actifs. Les dispositifs passifs, largement utilisés en génie civil, modifient la rigidité ou l'amortissement du système sans nécessiter d'énergie externe. En revanche, le contrôle actif implique l'utilisation d'une source d'énergie importante pour imposer des forces ou des déplacements à la structure. Le contrôle semi-actif combine des caractéristiques des systèmes actifs et passifs, nécessitant une faible source d'énergie pour modifier les propriétés mécaniques.

Dans le domaine des ponts, les dispositifs d'isolation passifs à base d'élastomères, tels que les appareils d'appui en élastomère fretté à amortissement élevé (HDRB) et ceux avec noyau de

plomb (LRB), sont couramment utilisés. Parmi les nombreuses autres techniques d'isolation, les systèmes à base de glissement permettent de découpler les mouvements de la superstructure de ceux des éléments de fondation via des interfaces de glissement, dissipant ainsi l'énergie sismique par friction. Par exemple, le système de pendule à friction utilise une interface de glissement sous forme de cuvette pour conférer à la structure un mouvement similaire à un pendule, contrôlant ainsi la période d'isolation et la quantité d'énergie dissipée [13].

### I.6.1 Isolateurs en Élastomère Fretté à Amortissement Élevé (HDRB)

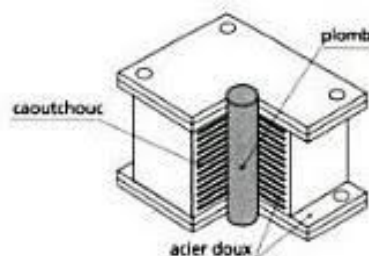
Les isolateurs en élastomère fretté à amortissement élevé sont conçus pour augmenter la période naturelle de la structure et dissiper efficacement l'énergie sismique afin de limiter les déplacements en cas de séisme. Ils sont capables de supporter des déformations en cisaillement importantes grâce à leur comportement non linéaire, où la rigidité diminue considérablement pour de grandes déformations. Le taux d'amortissement des HDRB varie généralement entre 10 et 16% de l'amortissement critique.



**Figure I-12 :** Isolateurs en élastomère fretté à Amortissement Élevé (HDRB) [13].

### I.6.2 Isolateurs en Élastomère Fretté avec Noyau de Plomb (LRB)

Les isolateurs en élastomère fretté avec noyau de plomb offrent une combinaison unique de rigidité et de capacité d'amortissement pour la protection sismique des ponts. Composés de feuilles de caoutchouc alternées avec des plaques minces en acier et des barreaux de plomb, ces dispositifs fournissent une réponse élasto-plastique efficace lors de déformations importantes. La présence du plomb au centre du dispositif permet d'augmenter la rigidité initiale tout en offrant une dissipation d'énergie optimale. La limite élastique du LRB est proportionnelle au diamètre du noyau de plomb, ce qui influence le taux d'amortissement critique et la quantité d'énergie dissipée. En conséquence, les LRB offrent une solution fiable pour minimiser les dommages sismiques et garantir la sécurité des infrastructures et des usagers.



**Figure I-13 :** Isolateurs en élastomère fretté avec noyau de plomb (LRB) [13]

### I.6.3 Isolateurs à pendule à friction (FPS)

Le système de pendule à friction (FPS) est une méthode d'isolation sismique utilisée dans le domaine du génie civil pour réduire les effets des vibrations sismiques sur les structures. Ce système repose sur le principe de la friction entre deux surfaces, généralement une surface concave en acier et un élément cœur en acier coiffé d'un matériau de frottement tel que le polytétrafluoroéthylène (PTFE), également connu sous le nom de Téflon. Lorsqu'un séisme survient, les mouvements horizontaux de la structure entraînent des déplacements relatifs entre ces deux surfaces, générant ainsi une force de friction qui dissipe l'énergie sismique [7].

Le FPS offre plusieurs avantages dans la conception parasismique des structures. Tout d'abord, il permet de réduire efficacement les forces sismiques transmises à la structure en isolant la superstructure des mouvements du sol. De plus, il offre une grande capacité de charge axiale, ce qui en fait une solution adaptée pour les structures de grande envergure. Enfin, le FPS est relativement facile à modéliser, car ses caractéristiques mécaniques dépendent principalement de quelques paramètres clés, tels que le coefficient de friction, la charge axiale et la courbure de la surface de contact.

Grâce à sa capacité à supporter de grandes charges axiales et à dissiper efficacement l'énergie sismique, le FPS est largement utilisé dans la conception de bâtiments, de ponts et d'autres structures exposées aux risques sismiques. Son utilisation permet d'améliorer la résilience des infrastructures face aux tremblements de terre et contribue ainsi à assurer la sécurité des populations et la durabilité des constructions.



Figure I-14 : Isolateurs à pendule de friction (FPS) [7].

### I.6.4 Amortisseurs visqueux

Les amortisseurs visqueux sont constitués d'un cylindre creux rempli d'un fluide à base d'huile de silicone, contraint de s'écouler entre les orifices du dispositif, ce qui entraîne une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Ces dispositifs sont similaires à des vérins hydrauliques à double effet, offrant une capacité élevée de dissipation d'énergie. La relation entre la force d'amortissement  $F$  et la vitesse relative  $V$  peut être exprimée par l'équation (1-2) [9].

$$F = C.V.\alpha \quad (1-2)$$

Où  $C$  et  $\alpha$  sont des paramètres dépendant de la loi de comportement du fluide ainsi que des choix de fabrication et de conception des dispositifs.



**Figure I-15** : Amortisseurs visqueux [9].

## **I.7 Généralité sur l'isolateur sismique pendule à friction**

Les pendules à friction se démarquent des autres types d'appuis parasismiques par leur mode de fonctionnement : deux éléments se déplacent l'un par rapport à l'autre pour autoriser le déplacement latéral de la structure et absorber l'énergie. Leur utilisation est flexible, adaptable aussi bien aux structures légères qu'aux structures massives, leur période de vibration étant uniquement déterminée par le rayon de courbure. De plus, ils supportent aisément des charges verticales importantes et offrent un amortissement supérieur à 50 %. Toutefois, contrairement à d'autres types d'appuis, ils ne peuvent être combinés avec d'autres dispositifs sur une même structure.



**Figure I-16** : Isolateur à pendule à friction en cours d'installation sur le pont Benecia-Martinez, Californie [13].

### **I.7.1 Historique**

L'histoire des pendules à friction remonte à l'Antiquité, mais leur application moderne dans le contexte de l'isolation sismique a commencé à émerger dans les années 1970. Une première proposition notable remonte à 1909, lorsque Mario Viscardini a breveté un dispositif d'isolation par friction après le tremblement de terre de Messine. Cependant, les limitations technologiques de l'époque ont rendu sa conception irréalisable [13].

Le véritable essor des pendules à friction modernes a eu lieu dans les années 1980. En 1985, Victor Zayas dépose un brevet pour un système de pendule à friction, publié en 1987. Ce système repose sur des dispositifs basés sur le frottement et la réponse d'un pendule. Les années suivantes ont été marquées par des développements significatifs dans les matériaux et les

conceptions des pendules à friction, surmontant les défis liés aux performances des matériaux à faible friction, à l'échauffement, à la pression de contact et à la vitesse [13].

Dans les années qui ont suivi, des améliorations constantes ont été apportées aux matériaux et aux conceptions, conduisant à des systèmes plus sophistiqués et plus efficaces. Bien que les premières applications de pendules à friction en Europe aient été relativement limitées, des projets notables comme le viaduc de Bolu en Turquie ont démontré l'efficacité de ces dispositifs dans des contextes sismiques difficiles. Ainsi, l'histoire des pendules à friction témoigne d'un développement continu et d'une adaptation aux besoins changeants de l'ingénierie parasismique, offrant une protection essentielle aux structures contre les effets des séismes [13].

### I.7.2 Avantages

- **Réduction des dégâts sismiques** : Les pendules à friction aident à réduire les dommages sismiques en permettant à la structure de se déplacer de manière contrôlée pendant un tremblement de terre, absorbant ainsi une grande partie de l'énergie sismique et réduisant les forces sismiques transmises à la structure.
- **Maintien de l'intégrité structurale** : En permettant à la structure de rester élastique pendant un séisme, les pendules à friction aident à préserver l'intégrité structurale, ce qui peut réduire les coûts de réparation et de reconstruction après un événement sismique.
- **Compatibilité avec les structures existantes** : Les pendules à friction peuvent être installés sur des structures existantes sans nécessiter de modifications majeures, ce qui les rend adaptés à la réhabilitation sismique des bâtiments existants.
- **Flexibilité de conception** : Ils offrent une grande flexibilité de conception, ce qui permet aux ingénieurs de concevoir des systèmes d'isolation sismique adaptés à une variété de structures et de conditions géotechniques.
- **Longue durée de vie** : Les pendules à friction sont généralement conçus pour avoir une longue durée de vie avec peu ou pas d'entretien requis, ce qui en fait une solution durable pour la protection sismique des infrastructures.

### I.7.3 Évolution des systèmes pendule à friction et innovations récentes

L'évolution des systèmes à pendule à friction (FPS) a été remarquable depuis leur première application en 1994 dans un projet de rénovation. Initialement conçus avec un seul pendule et deux surfaces de glissement, ces dispositifs ont depuis été améliorés pour inclure des versions à triple pendule avec quatre surfaces. Selon (Charleson & Guisasola, 2017), les versions les plus récentes, connues sous le nom de curseurs courbes, offrent des performances dynamiques améliorées sur une large gamme de mouvements sismiques et permettent des paliers de diamètres plus petits grâce à des rayons de courbure variables et des coefficients de friction différents [7].

Le roulement à pendule double est constitué de deux surfaces concaves en acier inoxydable séparées par un curseur articulé. Cette conception permet un glissement simultané et découplé sur les deux surfaces, ce qui augmente considérablement la capacité de déplacement par rapport aux dispositifs à pendule simple. De même, le roulement à pendule triple, avec son ensemble curseur interne emboîté, offre une capacité de déplacement encore plus grande en permettant des rotations différentielles des surfaces supérieure et inférieure [7].

Une variante du roulement à pendule simple, appelée roulement à pendule simple modifié, comprend une plaque de glissement intermédiaire introduite pour améliorer les propriétés de glissement. Cependant, cette conception nécessite des dimensions plus importantes et est moins attrayante pour la mise en œuvre.

L'introduction de différentes zones de coefficient de frottement sur le périmètre des surfaces de glissement, comme observé dans les récents systèmes FP, augmente la variabilité du comportement et améliore le comportement global de la structure pour différents types d'actions sismiques.

Ces innovations dans les FPS ont considérablement optimisé la dissipation d'énergie et la réponse aux mouvements sismiques, offrant ainsi des solutions plus efficaces et économiques pour la protection des structures contre les tremblements de terre [7].

## **I.8 Conclusion**

Cette revue de littérature met en évidence l'importance des dispositifs parasismiques pour protéger les infrastructures contre les séismes. Différents types de dispositifs ont été examinés, notamment les appareils d'appui à pendule à friction. Chaque type d'appareil d'appui présente une approche d'isolation différente plus ou moins efficace. Leurs choix se font suivant l'importance de l'ouvrage à protéger et la sismicité du site de celui-ci.

Le prochain chapitre explorera plus en détail le comportement mécanique et dynamique de ces appareils sur un cas pratique d'un ouvrage d'art réel.

# Chapitre II. Comportement mécanique et dynamique des appareils d'appuis à pendule à friction

## II.1 Introduction

Il existe deux types de dispositifs de glissement utilisés dans les systèmes d'isolation sismique. Tout d'abord, les paliers de glissement plat relativement simples, et deuxièmement, les curseurs courbes beaucoup plus sophistiqués. Les différences entre eux reposent sur la géométrie de leur surface de glissement. Les curseurs courbes sont capables de fonctionner comme un système d'isolation en eux-mêmes, tandis que les paliers de glissement plat nécessitent généralement un système complémentaire pour maintenir un équilibre stable.

Les curseurs courbes, fabriqués avec une surface concave cylindrique ou sphérique, assurent un équilibre stable en combinaison avec les forces de gravité. Par exemple, le "système de pendule à friction" combine le glissement par frottement de surfaces en acier inoxydable, séparées par une couche de Téflon, avec le mouvement de pendule du curseur sur une surface concave parfaitement sphérique.

Les avantages de ce mécanisme incluent sa capacité de recentrage due à sa géométrie concave, ainsi que sa capacité à dissiper une grande quantité d'énergie. Le frottement entre les surfaces permet de transformer une partie de l'énergie cinétique en énergie thermique, tandis que le mouvement pendulaire du curseur convertit une partie de l'énergie en énergie potentielle. Ce processus de mouvement oscillant, connu sous le nom de mouvement de pendule coulissant, permet une dissipation d'énergie répétée et réversible, contribuant ainsi à la stabilité de la structure isolée.

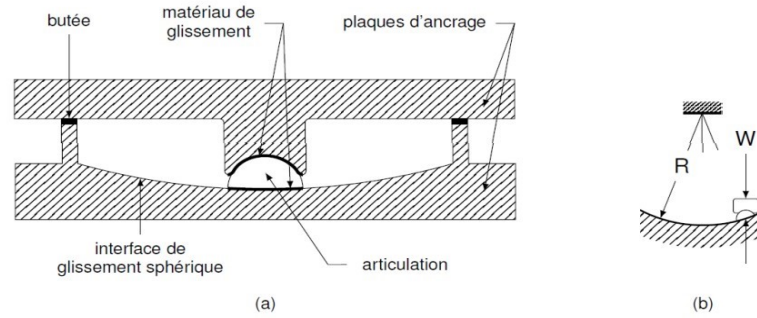


Figure II-1 : Assemblage des différents éléments d'un pendule à friction [7].

## II.2 Dispositifs de pendule de friction (FPS)

Les dispositifs de pendule à friction (FPS) représentent une catégorie spécifique d'isolateurs sismiques qui autorisent des mouvements relatifs entre la superstructure et la sous-structure en utilisant des surfaces sphériques avec un mécanisme de pendule intégré. Ce système de pendule à friction est composé d'une surface concave en forme de sphère, revêtue d'une plaque d'acier inoxydable poli, sur laquelle se déplace un élément articulé en matériau composite Téflon. Ce

matériau est sélectionné pour fournir une résistance au frottement minimale, permettant ainsi de maintenir uniformément le contact avec la surface concave pendant les mouvements [7].



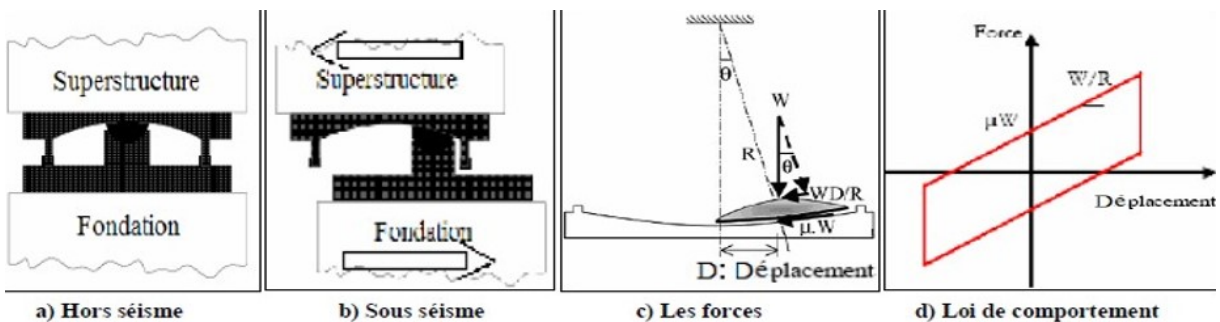
**Figure II-2 :** Illustration des composants du dispositif de pendule à friction [7].

### II.2.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des systèmes de pendule à friction (FPS) repose sur l'utilisation de surfaces sphériques avec un mécanisme de pendule intégré pour permettre des déplacements relatifs entre la superstructure et la sous-structure [11]. La période fondamentale de ce système est principalement déterminée par la longueur du pendule, qui est définie par le rayon de courbure de la surface de glissement sphérique. L'énergie de dissipation est assurée par les frottements rencontrés lors du mouvement des surfaces de glissement, ce qui lie étroitement la réponse dynamique des dispositifs à leur friction. L'activation du système se produit lorsque les forces horizontales excèdent la valeur statique de frottement, permettant ainsi le développement d'une force latérale résultant de la combinaison des forces de frottement et de rappel le long de la surface sphérique [14]. En outre, dans le FPS, la flexibilité latérale est obtenue par le biais de l'interface de glissement, qui peut être lubrifiée avec de la graisse de silicone. La disposition de cette interface sur une surface sphérique permet un déplacement latéral de la masse, ainsi qu'un mouvement vertical vers le haut, offrant ainsi une plus grande rigidité latérale par rapport aux dispositifs de glissement sur des surfaces planes.

La dissipation est assurée par les frottements rencontrés lors du mouvement du coulisseau sur les surfaces de glissement. La réponse dynamique de ces dispositifs est donc strictement liée à leur friction.

Une fois que les forces horizontales dépassent la valeur statique de frottement, le système du pendule à friction est activé. Lorsqu'il est mis en mouvement, l'appareil développe une force latérale résultant de la combinaison des forces de frottement demandées et de celles de rappel le long de la surface sphérique. Cette force latérale est essentielle pour contrôler et stabiliser les mouvements de la superstructure pendant les séismes, permettant ainsi au système de pendule à friction de remplir son rôle d'isolation sismique avec efficacité [14].



**Figure II-3 :** Principe de fonctionnement et loi de comportement [14].

## II.2.2 Matériaux des surfaces de glissement

Les dispositifs FPS font appel à des matériaux de surface de glissement pour faciliter les mouvements relatifs entre la superstructure et la sous-structure. Parmi ces matériaux, l'acier inoxydable et le polytétrafluoroéthylène (PTFE ou Téflon®) se distinguent comme choix privilégiés en raison de leurs propriétés remarquables. L'acier inoxydable est vanté pour sa résistance à la corrosion et sa robustesse, ce qui en fait une option idéale pour les environnements difficiles. De plus, sa surface lisse réduit le frottement, améliorant ainsi l'efficacité des dispositifs FPS. D'autre part, le PTFE, réputé pour ses qualités de lubrification et sa résistance chimique, offre une faible adhérence qui réduit considérablement le frottement, permettant ainsi une dissipation efficace de l'énergie sismique. Ces deux matériaux présentent l'avantage supplémentaire d'exiger peu d'entretien, ce qui contribue à minimiser les coûts de maintenance à long terme et à garantir la durabilité des dispositifs d'isolation sismique [11].

## II.2.3 Rôle fondamental

Les dispositifs d'isolation sismique FPS remplissent quatre fonctions fondamentales lorsqu'ils sont positionnés entre la sous-structure et la superstructure (c'est-à-dire entre les piles et les poutres).

- **Transfert des charges verticales** : Ils assurent le transfert efficace des charges verticales de la superstructure à la sous-structure, agissant comme des systèmes de roulement conventionnels.
- **Allocation de déplacements horizontaux** : Ils permettent une certaine flexibilité horizontale de la structure, réduisant ainsi la transmission des forces sismiques.
- **Dissipation de l'énergie sismique** : Les isolateurs absorbent et dissipent l'énergie générée pendant les secousses pour contrôler les déplacements sismiques maximum.
- **Auto centrage** : Ils garantissent que la structure du pont revient toujours à sa position centrale après un tremblement de terre, assurant ainsi la stabilité structurelle. Cette fonction est principalement réalisée par les dispositifs avec surface de glissement sphérique grâce à leur capacité de stockage et de libération automatiques de l'énergie cinétique.

## II.3 Types de dispositifs FPS

Les systèmes de pendule à friction (FPS) peuvent être divisés en deux types principaux :

- Les FPS mono-concaves
- Les FPS double concaves

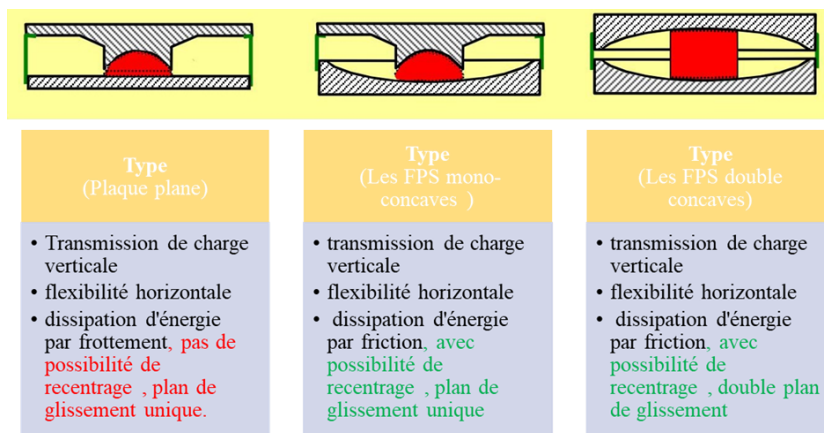
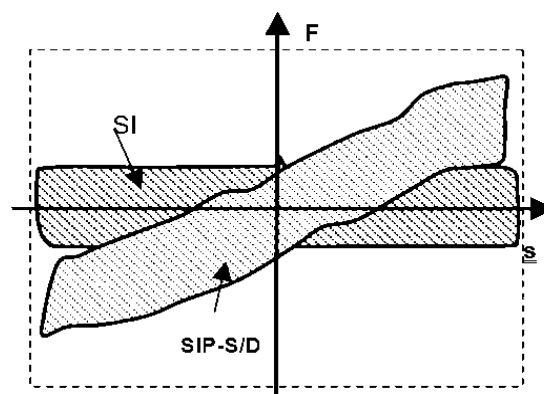


Figure II-4 : Types de dispositifs FPS.

- **Les FPS mono-concaves** se caractérisent par un curseur concave, une surface de glissement concave secondaire et un élément intermédiaire en acier avec deux surfaces convexes. Ils permettent le mouvement horizontal et rotatif.
- **Les FPS double concaves** comportent deux surfaces de glissement concaves primaires adaptées au mouvement horizontal et rotatif. Cette configuration réduit considérablement les dimensions de l'appareil et divise par deux l'excentricité de la charge verticale par rapport aux FPS mono-concaves.
- **Le troisième type d'isolateur**, se compose d'une plaque inférieure plane coulissante recouverte d'une tôle en acier inoxydable sur le dessus. Cette plaque inférieure est revêtue d'un matériau de revêtement permettant le glissement. Le matériau de revêtement est fixé à une construction spéciale dans l'évidement sur la partie sphérique. En option, la partie supérieure de la partie sphérique peut être chromée dur pour glisser à nouveau contre ce matériau, fixé sur le boîtier. Le roulement peut également être monté à l'envers, selon les capacités de transmission de charge de la superstructure et de la sous-structure. Pour protéger contre la poussière, un tablier en caoutchouc élastique est fixé sur la partie supérieure pour protéger la surface de glissement contre les principaux dépôts de poussière.

## II.4 Dissipation d'énergie et Contrôle Structurel dans les Dispositifs de Pendule à Friction (FPS)

Lors d'un tremblement de terre, le mouvement relatif se produit entre le sol et le pont. Ce mouvement génère un frottement entre les surfaces de glissement du système de support du pont, ce qui crée une dissipation d'énergie. Cette dissipation d'énergie est fondamentale pour le contrôle structural du pont. Elle est rendue possible grâce à des coefficients de frottement spécifiquement définis entre les partenaires de glissement, comme le revêtement et l'acier inoxydable, avec une plage typique de valeurs allant de  $\mu = 0,005$  à  $0,13$  pour chaque roulement individuel. Ces coefficients permettent de convertir l'énergie de déplacement en chaleur, contribuant ainsi à maintenir la stabilité structurelle du pont pendant un tremblement de terre. Les principales boucles hystérétiques illustrées dans la figure démontrent comment ces dispositifs, absorbent et dissipent efficacement l'énergie sismique pour protéger le pont contre les dommages [22].



**Figure II-5 :** Illustration de la dissipation d'énergie  
**SI :** FPS avec surface plane ; **SIP-S/D :** FPS avec mono concave / et double concave

## II.5 Comportement dynamique et mécanique d'un dispositif FPS

### II.5.1 Analyse Mécanique

Le modèle mécanique qui correspond les FPS est :

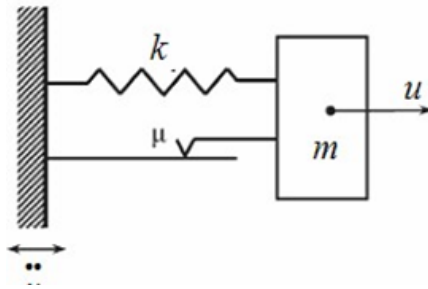


Figure II-6 : Le modèle mécanique de FPS [11].

Ce modèle se distingue par sa rigidité  $k$ , qui est proportionnelle au poids  $W$  de la structure et au rayon de courbure  $R$ , ainsi qu'au coefficient de frottement  $\mu$ . La force latérale générée dans ce système est exprimée par l'équation (II-1) :

$$F = \frac{W}{R} \cdot u + \mu \cdot W \cdot \frac{\dot{u}}{|\mu|} \quad (\text{II-1})$$

$R$  : Rayon de courbure de la surface sphérique

$W$  : Le poids de la structure

L'équation (II-2) de mouvement est :

$$m(\dot{u} + \ddot{u}_g) + F = 0 \quad (\text{II-2})$$

Soit

$$m\ddot{u} + m\ddot{u}_g + \frac{W}{R} \cdot u + \mu \cdot W \cdot \frac{\dot{u}}{|\mu|} = 0 \quad (\text{II-3})$$

Le rapport entre le poids de la structure et le rayon de courbure est exprimé dans l'équation (II-4).

$$K = \frac{W}{R} \quad (\text{II-4})$$

$$\ddot{u} + \omega_0^2 \cdot u + \mu \cdot g \cdot \frac{\dot{u}}{|\mu|} = -\ddot{u}_g \quad (\text{II-5})$$

Où

$$\omega_0^2 = \frac{g}{R} \quad (\text{II-6})$$

Et

$$W = m \cdot g \quad (\text{II-7})$$

## II.5.2 Comparaison du Comportement Dynamique des Dispositifs de Glissement avec Surface Plate et Sphérique

Les dispositifs de glissement avec une surface de glissement plate (Figure 24 – a) limitent la force transmise à la superstructure par l'équation (II-8) :

$$F_{max} = \mu_d \cdot N_{sd} \cdot \text{sgn}(d_b) \quad (\text{II-8})$$

$\mu_d$  : le coefficient de friction dynamique

$N_{sd}$  : la force normale à travers le dispositif, c'est-à-dire le poids de la superstructure

$\text{Sgn}(d_b)$  : le signe du vecteur vitesse,  $d$  étant le déplacement relatif des deux surfaces de glissement.

$$W = m_d \cdot g \quad (\text{II-9})$$

Cependant, de tels dispositifs peuvent entraîner des déplacements permanents substantiels. Par conséquent, ils devraient être utilisés en combinaison avec des dispositifs offrant une capacité de restauration adéquate.

Au contraire, les dispositifs de glissement avec une surface de glissement sphérique de rayon  $R_b$  (Figure II-7.b) fournissent également une force de restauration au déplacement  $d_b$ , de sorte que la relation force-déplacement soit l'équation (II-10) :

$$F_{max} = \frac{N_{sd}}{R_b} \cdot d_b + \mu_d \cdot N_{sd} \cdot \text{sgn}(d_b) \quad (\text{II-10})$$

L'équation (II-10) représente une loi hystérétique non linéaire et, en particulier, le comportement des dispositifs de glissement peut être modélisé par une loi bilinéaire (Figure II 7), caractérisée par trois principaux paramètres [11] :

— La résistance caractéristique

$$F_0 = \mu_d \cdot N_{sd} \quad (\text{II-11})$$

— La rigidité secondaire (plastique)  $k_p$ , qui est liée à la force de restauration et représente la rigidité du système correspondant à la branche plastique, une fois le seuil de frottement dépassé :

$$K_p = \frac{N_{SD}}{R_d} \quad (\text{II-12})$$

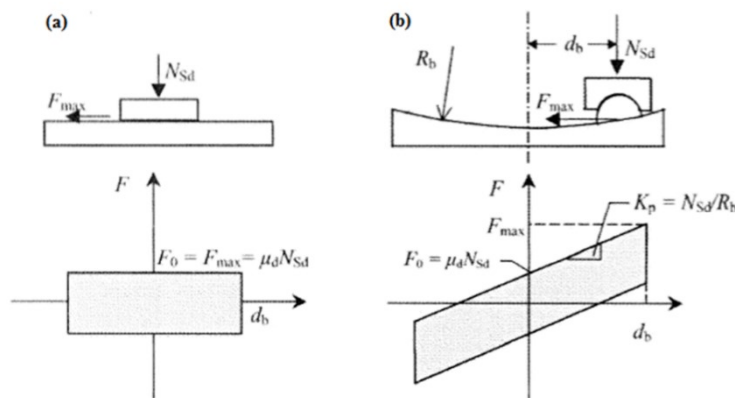


Figure II-7 : Comportement Dynamique des Dispositifs de Glissement avec (a) Surface Plate et (b) Sphérique [11].

— La rigidité élastique  $K_e$ , considérée comme proportionnelle à la rigidité secondaire par un coefficient  $\alpha$  :

$$K_e = \alpha \cdot K_p \quad (\text{II-13})$$

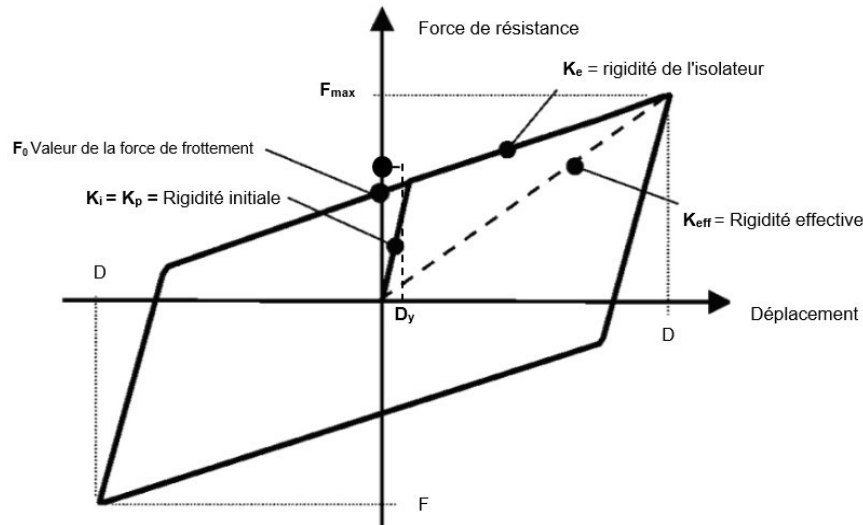


Figure II-8 : Courbe hystérétique type d'un appareil d'appui à friction à pendule

### II.5.3 Analyse de l'hystérésis

En réalité, les dispositifs de glissement se caractérisent par une rigidité virtuellement infinie tant que la force horizontale n'excède pas la force de friction statique : c'est pourquoi le premier segment du cycle d'hystérésis est généralement considéré comme vertical. Dans ce sens, le professeur Kelly a suggéré une valeur de  $\alpha = 51$  [7]. Ainsi, dans une première phase, appelée phase d'adhérence, la superstructure et la sous-structure sont rigoureusement connectées et l'ensemble du système peut être considéré comme se comportant comme une structure non isolée [7]. Après avoir dépassé le seuil de friction statique, le mouvement pendulaire commence et le système est régi par la rigidité secondaire  $K_p$ . Une fois que le déplacement maximal est atteint, le coefficient de friction devient instantanément nul. Dans cette phase, pour permettre au mouvement pendulaire de recommencer dans la direction opposée, le seuil de friction doit être à nouveau dépassé : cela est représenté par un segment vertical de longueur  $2F_0$  dans la Figure II-8 [7].

### II.5.4 Analyse Dynamique des Pendules à Friction

Le comportement dynamique non linéaire des dispositifs de glissement peut être bien expliqué en analysant le schéma représenté dans la Figure II-9 [7], qui montre les forces agissant sur le pendule :

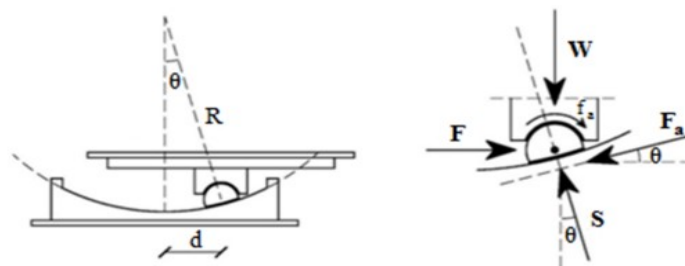


Figure II-9 : Illustration du comportement mécanique et les différents paramètres de FPS [7].

**W** : Poids au-dessus de l'appareil d'appuis

**F<sub>a</sub>** : Force de frottement (friction)

**F** : la force latérale

**S** : la force de contact, orthogonale à l'interface de glissement

**μ** : coefficient de friction dynamique

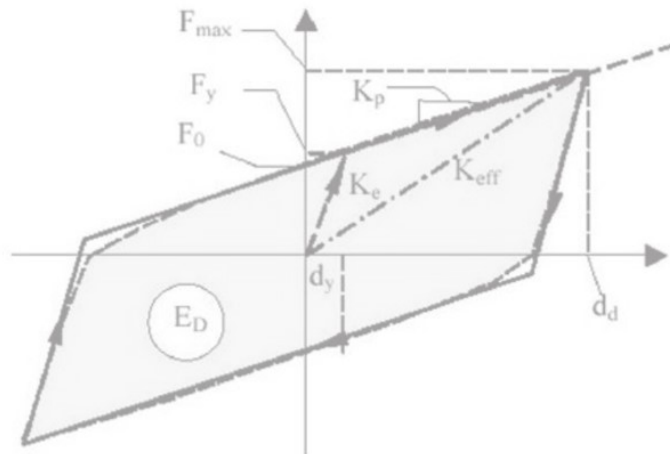
Le comportement des roulements à pendule à friction suit la même équation de mouvement que les pendules classiques, avec une période de vibration directement proportionnelle au rayon de courbure de la surface concave. L'équation de la période (II-14).

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (\text{II-14})$$

Où  $g$  est l'accélération gravitationnelle. La période de glissement semble être simplement déterminée par le rayon  $R$ .

Les grandes surfaces de courbure permettent des déplacements de longue période, et la friction entre le curseur articulé et la surface concave dissipe l'énergie, et le poids du pont agit comme une force de rappel en raison de la courbure de la surface de glissement (Figure II-9).

La boucle d'hystérésis force-déplacement idéalisée pour l'isolateur à pendule à friction est illustrée à la figure II-10 :



**Figure II-10** : Comportement hystérétique idéalisé force /déplacement d'un isolateur à pendule à friction

Avec 
$$M = \frac{W}{g} \quad (\text{II-15})$$

Alors 
$$T_{eff} = 2\pi \times \sqrt{\frac{M}{K_{eff} \cdot g}} \quad (\text{II-16})$$

On obtient 
$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{W}{K_{eff}}} \quad (\text{II-17})$$

La résistance du roulement aux forces horizontales visant à augmenter le déplacement est assurée par la résistance de frottement,  $F_a$ , qui se manifeste à l'interface entre le curseur

articulé et la surface concave, comme illustré dans la figure II-9. Cette force est égale au produit du coefficient de frottement dynamique,  $\mu$ , et de la composante du poids normale à la surface concave (Force de frottement)  $F_a$ , exprimée par l'équation (II-18)

$$F_a = \mu \cdot W \cdot \cos \theta \quad (\text{II-18})$$

Lorsque nous effectuons l'équilibre des moments par rapport au point O.

$$\text{Equilibre des moments} \quad \sum M_T/o = 0 \quad (\text{II-19})$$

$$\text{Nous obtenons} \quad F \cdot R \cdot \cos \theta = W \cdot R \cdot \sin \theta + F_a \cdot R \quad (\text{II-20})$$

$$\Rightarrow F = \frac{W \cdot R \cdot \sin \theta}{R \cdot \cos \theta} + \frac{\mu \cdot W \cdot R \cdot \cos \theta}{R \cdot \cos \theta} \quad (\text{II-21})$$

Ensuite, si le déplacement D du roulement est petit par rapport au rayon R de la surface concave, nous pouvons approximer que :

$$\text{Avec } \theta \ll \Rightarrow \cos \theta = 1 \quad (\text{II-22})$$

$$\text{Et} \quad D = R \cdot \sin \theta \quad (\text{II-23})$$

On remplace les équations (II-22) et (II-23) dans (II-21). On obtient l'équation (II-24)

$$F = \frac{W \cdot D}{R} + \mu \cdot W \quad (\text{II-24})$$

Puisque les isolateurs présentent un comportement non linéaire, il est nécessaire d'avoir des propriétés linéarisées équivalentes pour utiliser des méthodes d'analyse élastiques. Ces propriétés comprennent la rigidité effective du roulement et un rapport d'amortissement visqueux équivalent pour tenir compte de l'effet de la dissipation d'énergie hystérétique.

La rigidité effective du roulement, notée  $K_{eff}$ , est obtenue en divisant la force horizontale F par le déplacement correspondant D du roulement, Rigidité horizontale due à l'augmentation de la masse, selon l'équation (II-25).

$$K = \frac{W}{R} \quad (\text{II-25})$$

Rigidité de l'appareil d'appuis

$$K = \frac{F}{D} \quad (\text{II-26})$$

$$K = \frac{W}{R} + \frac{W \cdot \mu}{D} \quad (\text{II-27})$$

Rigidité effective

$$K_{eff} = \frac{F}{D_{max}} = \frac{\frac{W \cdot D_{max}}{R} + \mu \cdot W}{D_{max}} \quad (\text{II-28})$$

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu \cdot W}{D_{max}} \quad (\text{II-29})$$

En intégrant les courbes hystérétiques (Figure II-10). On obtient l'amortissement effectif de l'isolateur à friction produit par frottement  $\xi$

$$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mu}{\mu + \frac{D}{R}} \quad (\text{II-30})$$

$$\xi_{eff} = \sum \frac{E_d}{2\pi \cdot K_{eff} \cdot D_{max}^2} \quad (\text{II-31})$$

la surface est illustrée dans la figure II-10 qui représente le comportement hystérétique idéalisé de déplacement de force d'un isolateur à pendule à friction, représente l'Energie dissipée par cycle.

$$E_d = 4 \cdot W \cdot \mu \cdot (D_{max} - D_y) \quad (\text{II-32})$$

$$E_d = 2 \cdot F_0 \cdot (2 \cdot D_{max}) \quad (\text{II-33})$$

$\mu_d$  : Valeur nominale du coefficient de frottement dynamique

Avec  $\mu_d = 0,040$

Et

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{dmin} = 0,030 \quad \text{Limite inferieure (Lower Bound Design Properties LBDP)} \\ \mu_{dmax} = 0,081 \quad \text{Limite superieure (Upper Bound Design Properties UBDP)} \end{array} \right.$$

$$\eta = \sqrt{\frac{0,10}{0,05 + \xi_{eff}}} \geq 0,40 \quad (\text{II-34})$$

$$\mu_{fast} = 2,5 \cdot \left(\frac{N_{sd}}{N_{ed}}\right)^{-0,834} \quad (\text{II-35})$$

$$\mu_{slow} = 5,5 \cdot \left(\frac{N_{sd}}{N_{ed}}\right)^{-0,563} \quad (\text{II-36})$$

$$\mu = \mu_{fast} - (\mu_{fast} - \mu_{slow}) \cdot e^{-r \cdot v} \quad (\text{II-37})$$

Avec

$v$  : Vitesse de glissement

$r$  : Paramètre de pression

Pour vérifier la conformité selon l'Eurocode, la condition (II-36) suivante doit vérifiée

$$d_{rm} \leq d_m - 0,75 \cdot d_d \quad (\text{II-38})$$

$d_{rm}$  : Déplacement maximum de l'isolateur .

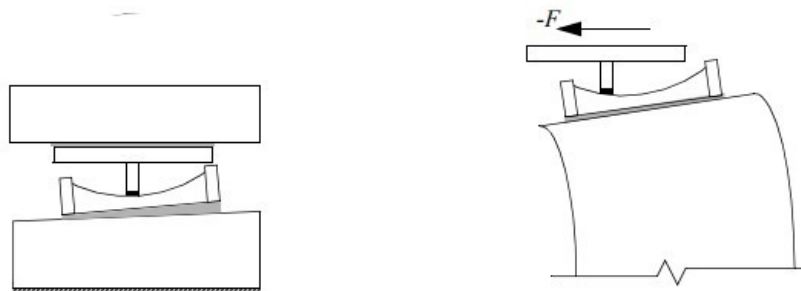
$d_m$  : Capacité de déplacement maximum.

$d_d$  : Déplacement de conception

Cela signifie que pour qu'un isolateur soit conforme à l'Eurocode, le déplacement maximum de l'isolateur doit être inférieur ou égal à la capacité de déplacement maximum diminuée de 0,75 fois le déplacement de conception [17].

## II.6 La Rotation des appareils d'appuis à pendule de friction

Dans les applications de pont, les appuis peuvent être installés de manière non-niveau ou au sommet des piles flexibles, comme illustré dans la figure II-11. Dans les deux cas, le plateau concave tourne par rapport à la plaque de support et peut affecter le comportement des FPS (à pendule de friction). La connexion semi-sphérique pour le curseur articulé dans un FPS permet une rotation relative entre le plateau concave et la plaque de support sans transfert de moment. La rotation est limitée uniquement par la géométrie du palier, notamment l'espace entre le plateau concave et la plaque de support. Cette capacité de rotation rend les FPS particulièrement adaptés aux applications de pont où des rotations peuvent être imposées aux paliers par les piles. Bien que les FPS soient libres de tourner jusqu'à une certaine limite, la force de cisaillement résistante peut être modifiée en raison de la rotation. Les rotations de la surface sphérique (plateau concave) entraîneront un déplacement de la position d'équilibre du l'appareil d'appuis, car le curseur tend vers la surface tangente à l'horizontale (Figure II-11). La force de friction est pratiquement inchangée par un petit changement d'angle (Figure II-12). Les effets de la rotation sur un FPS dépendent du centre de rotation. Par exemple, un plateau concave tourné a un impact plus important sur la réponse qu'une plaque de support tournée. Une rotation dans le sens antihoraire,  $\theta$ , autour du point central de la surface sphérique,  $P_0$ , dans la Figure II-12, déplacera la position d'équilibre statique du palier de  $P_0$  à  $P_r$  d'une distance de  $\Delta x$  (ou approximativement, si une petite approximation d'angle est utilisée). Dans la Figure II-11,  $\Delta x$  continue d'être le déplacement du curseur par rapport au centre de la surface sphérique. L'angle satisfait désormais la relation a. hors-niveau b. pilier flexible (Figure II-12) [10].



a Figure II-11 : Principe de rotation des FPS [10] vier

Les conséquences de la rotation sur un roulement FP dépendent du point de rotation. Dans les applications de pont, les dispositifs d'appui peuvent être installés soit hors de niveau, soit au sommet de piles flexibles, selon le cas. Après rotation, les mouvements de la surface sphérique (plateau concave) entraînent un déplacement de la position d'équilibre du roulement, car le curseur tend à s'aligner sur la surface tangente à l'horizontale. Dans les deux configurations, la coupelle concave tourne par rapport à la plaque du pendule et la force de friction reste pratiquement inchangée par de petits changements d'angle. Par exemple, une assiette concave tournée affecte davantage la réponse qu'une plaque de pendule tournée. Une rotation dans le sens antihoraire,  $\theta_r$ , autour du point central de la surface sphérique,  $P_0$ , dans la figure II-11, déplace la position d'équilibre statique du roulement de  $P_0$  à  $P_r$  d'une distance de  $u_R$  représenté par l'équation (II-37) [10].

$$u_R = -R \cdot \sin\alpha \quad (\text{II-39})$$

Si l'on utilise une approximation aux petits angles, dans la figure II-12, le déplacement  $-R\alpha$  du curseur par rapport au centre de la surface sphérique reste constant. Où  $\alpha$  est l'angle de rotation. La connexion à douille semi-sphérique pour l'articulé permet une rotation relative entre le plateau concave et la plaque du Pendule sans transfert de moment. La rotation est limitée uniquement par la géométrie du roulement, à savoir la distance entre le plateau concave et la plaque du pendule [10].

$$\sin \theta_r = \frac{u - u_r}{R} \quad (\text{II-40})$$

et

$$\cos \theta_r = \frac{\sqrt{R^2 - (u - u_r)^2}}{R} \quad (\text{II-41})$$

En considérant les rotations de la surface sphérique, la force résistante pour un déplacement donné est donnée par :

$$F = \frac{N}{R}(u - u_r) + \mu \cdot N \quad (\text{II-42})$$

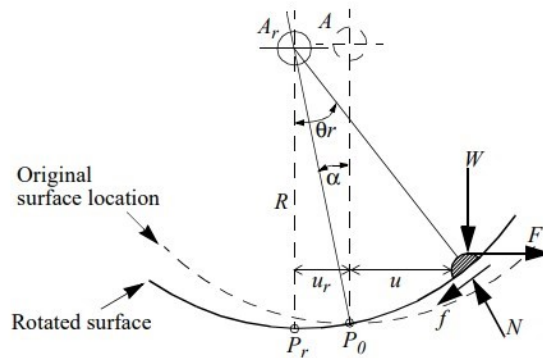


Figure II-12 : Surface sphérique du FPS après rotation [10].

## II.7 Coefficients de Frottement dans les Dispositifs d'Appui à Pendule à Friction

Dans les appareils d'appuis à pendule à friction, le coefficient de frottement joue un rôle important dans leur capacité à atténuer les vibrations sismiques et à prévenir les déformations structurelles. Les principaux points à retenir concernant le coefficient de frottement :

### II.7.1 Coefficient de Frottement Statique et Dynamique

Les dispositifs d'appui à pendule à friction possèdent à la fois un coefficient de frottement statique et un coefficient de frottement dynamique. Le premier correspond à la résistance au mouvement entre les surfaces en l'absence de déplacement, tandis que le second concerne la résistance lorsque les surfaces glissent l'une par rapport à l'autre [11].

### II.7.2 Dépendance aux Conditions de Contact

La variation des coefficients de frottement dans les dispositifs d'appui à pendule à friction dépend étroitement des conditions de contact entre les surfaces en jeu, notamment la rugosité des matériaux, la pression de contact, et la vitesse de glissement.

— **La rugosité des surfaces influence directement le coefficient de frottement** : des surfaces plus rugueuses génèrent une friction plus élevée, tandis que des surfaces plus lisses réduisent la résistance au mouvement relatif. De plus, la pression de contact influe sur la déformation des matériaux et donc sur leur adhérence et leur capacité à générer du frottement.

— **La vitesse de glissement joue également un rôle déterminant** : à des vitesses plus élevées, le coefficient de frottement peut varier en raison de phénomènes tels que le chauffage par frottement et la lubrification par des particules détachées des surfaces.

Ainsi, une étude approfondie des conditions de contact est nécessaire pour comprendre et prédire le comportement frictionnel des matériaux dans les dispositifs d'appui à pendule à friction, soulignant l'importance de tenir compte des caractéristiques des surfaces en contact, de la pression de contact et de la vitesse de glissement lors de la conception et de l'optimisation de ces dispositifs pour assurer leur performance optimale dans différentes situations.

### **II.7.3 Impact sur les Performances Sismiques**

Les coefficients de frottement exercent une influence déterminante sur les performances sismiques des dispositifs d'appui à pendule à friction. Un coefficient de frottement bien ajusté est essentiel pour garantir une dissipation efficace de l'énergie sismique et pour limiter les déformations structurelles lors d'un séisme.

Lorsqu'un tremblement de terre se produit, les mouvements sismiques entraînent des forces et des déformations significatives au sein des structures. Les dispositifs d'appui à pendule à friction interviennent en amortissant ces mouvements grâce à la friction entre les surfaces en contact. Un coefficient de frottement approprié permet une transmission contrôlée des forces sismiques, réduisant ainsi les effets destructeurs sur la structure.

Un coefficient de frottement trop élevé pourrait conduire à une rigidité excessive du système, limitant sa capacité à absorber l'énergie sismique et pouvant entraîner des déformations excessives ou des dommages structurels. À l'inverse, un coefficient de frottement trop faible pourrait ne pas suffisamment contrôler les forces sismiques, compromettant ainsi la stabilité et la sécurité de la structure.

### **II.7.4 Évaluation Expérimentale**

Les coefficients de frottement sont souvent déterminés par des études expérimentales, impliquant des tests sous différentes charges et vitesses de glissement afin de caractériser le comportement frictionnel des matériaux. Dans notre projet, nous avons réalisé une étude paramétrique dans le dernier chapitre pour examiner l'impact de la variation du coefficient de frottement sur différents rayons.

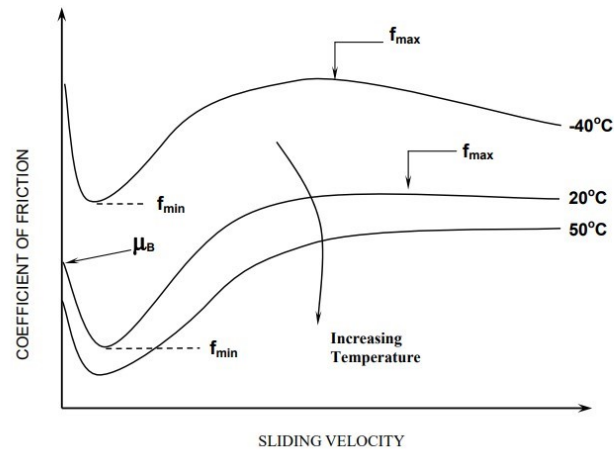
### **II.7.5 Les Facteurs Impactant le Coefficients de Frottement dans les dispositifs FPS**

— **Dépendance à la Charge Normale** : Les coefficients de frottement varient proportionnellement à la charge normale, atteignant une valeur presque constante à un certain point.

— **Effet des Déformations** : Les déformations élastiques et plastiques influencent les coefficients de frottement. Les déformations augmentent la surface de contact réelle, impactant ainsi les coefficients.

— **Influence de la Vitesse de Glissement** : Les coefficients de frottement fluctuent en fonction de la vitesse de glissement. À des vitesses élevées, le coefficient peut différer significativement de celui à des vitesses plus faibles.

— **Effet de la Température** : La température peut aussi influencer les coefficients de frottement, notamment pour les matériaux viscoélastiques comme le PTFE. La figure II-13 montre l'impact de température sur la vitesse de glissement et le coefficient de frottement.



**Figure II-13** : Variation de coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement pour différentes températures

## II.8 Conclusion

Le comportement mécanique et dynamique des appareils d'appuis à pendule à friction repose sur l'utilisation de surfaces sphériques et des mécanismes de pendule intégrés pour permettre des déplacements relatifs entre la superstructure et la sous-structure, réduisant ainsi les effets des forces sismiques. Ces dispositifs utilisent des matériaux comme l'acier inoxydable et le Téflon pour faciliter le glissement et la dissipation d'énergie. Ils remplissent des fonctions clés dans les structures sismiques, telles que le transfert de charges, l'allocation de déplacements horizontaux, la dissipation d'énergie sismique et l'auto-centrage. Différents types de dispositifs à pendule à friction existent, offrant des avantages tels que la réduction de la taille et de l'excentricité de la charge verticale. Le comportement dynamique de ces dispositifs est caractérisé par des lois hystérétiques non linéaires, avec une dissipation d'énergie importante lors des mouvements. Les coefficients de frottement jouent un rôle important dans leur performance sismique, influencés par des facteurs tels que la charge normale, les déformations, la vitesse de glissement et la température. Les études expérimentales sont souvent utilisées pour évaluer et ajuster ces coefficients en fonction des conditions spécifiques d'utilisation.

Nous allons entamer dans le chapitre suivant une modélisation par éléments finis pour mieux comprendre le comportement des ponts avec des systèmes d'appuis à pendule à friction (FPS).

# Chapitre III. Etude d'un pont utilisant le procédé d'appareil d'appuis à pendule à friction

## III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous plongeons dans l'analyse approfondie du comportement d'un pont ferroviaire sous l'effet des sollicitations sismiques, en nous concentrant sur l'efficacité des appareils d'appuis à pendule à friction (FPS) dans la réduction des vibrations et des effets sismiques. Notre objectif premier est d'évaluer le rôle des FPS dans l'amélioration de la résilience de la structure face aux séismes.

Nous nous concentrons sur l'objectif principal de notre étude : comparer le comportement d'un pont ferroviaire dans deux configurations distinctes. D'une part, nous examinons le pont équipé d'appareils d'appuis à pendule à friction (FPS), et d'autre part, nous analysons le même pont mais sans isolateurs, avec uniquement des appuis en néoprène fretté.

Nous présentons également les résultats obtenus de cette comparaison pour démontrer l'effet de l'isolateur sur le comportement du pont.

## III.2 Présentation de l'ouvrage

Nous nous engageons dans un projet de fin d'étude visant à analyser le comportement dynamique d'un pont ferroviaire mixte acier-béton, intégré au projet de la nouvelle ligne ferroviaire à grande vitesse (LGV) ANSERIF, et équipé d'appareils d'appuis à pendule à friction. Ce pont se situe sur le chemin entre Oued Tillât et Tlemcen, dans la région de la wilaya de Oran, couvrant les PK 119+435 à 119+665.

Le viaduc situé entre les PK 119+435 et 119+665 s'étend sur une longueur de 230 mètres et est positionné sur une section en courbe avec un rayon de courbure de 1 850 mètres. Tout au long du viaduc.

À l'origine, le viaduc se compose de quatre travées continues de 40 mètres chacune, ainsi que de deux travées continues de 35 mètres, toutes construites avec une ossature mixte du type quadri-poutre en acier à âme pleine. Ces poutres en acier sont fabriquées à partir de profils reconstitués soudés, et elles supportent une dalle en béton armé coulée sur place.

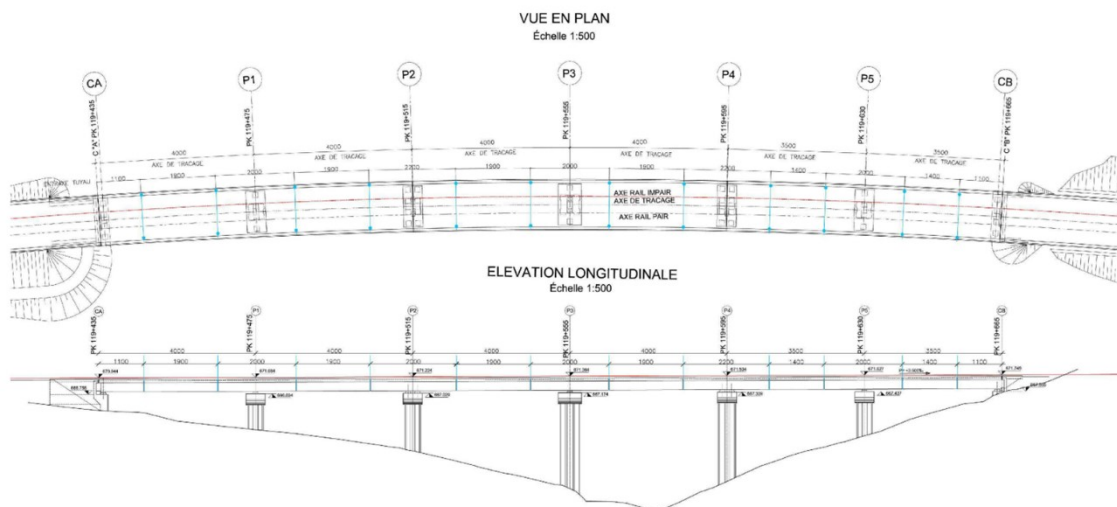


Figure III-1 : Vue en plan et évaluation longitudinale du projet

Les poutres en acier ont une hauteur de 2,30 mètres de quatre poutres espacées de 2.85 m, tandis que la hauteur moyenne de la dalle en béton armé est de 0,40 mètre. Des entretoises courantes sont prévues tous les 8 m, avec des entretoises spécifiques positionnées sur les axes des appuis. Le tablier du viaduc présente une largeur de 12,90 mètres.

Dans notre modélisation avec le logiciel SAP2000, Nous avons considéré toutes les travées comme ayant une longueur de 40 mètres, et le viaduc comme étant droit au lieu de courbe vu que le rayon de courbure est de 1500m, avec des entretoises tous les 4 mètres.

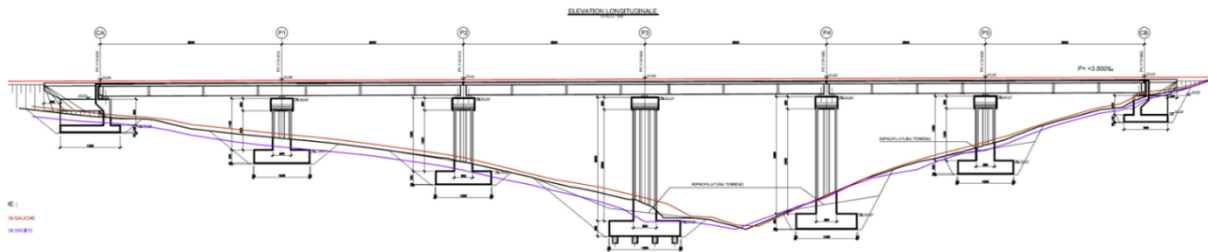


Figure III-2 : Profil en long de l'ouvrage

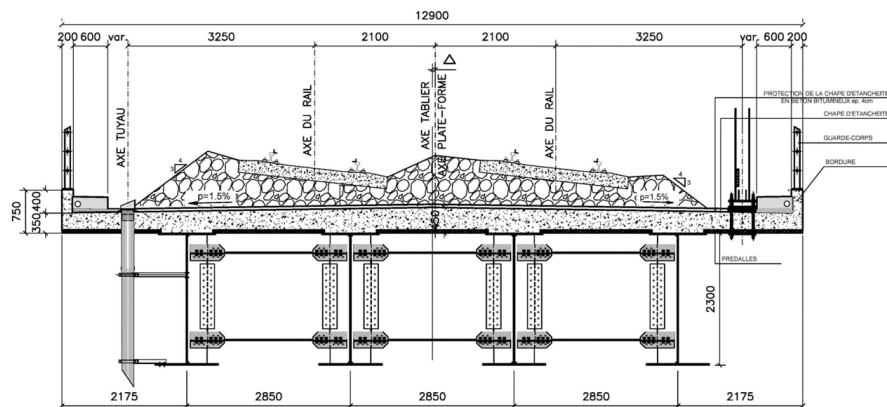


Figure III-3 : Profil en travers de l'ouvrage

Le tablier repose sur Cinq piles semi mobiles de dimensions 4×4 m, et une pile centrale de dimensions 5×5 m comme illustré dans la figure III-4. Les hauteurs respectives de ces piles sont les suivantes :

- Pile1 : 15 m
- Pile 2 : 17m
- Pile 3 (Pile centrale) :25 m
- Pile 4 :20 m
- Pile 5 :15 m

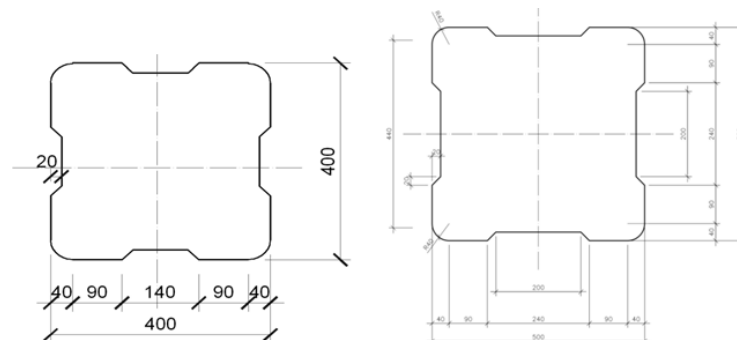


Figure III-4 : schématisation des piles

### III.2.1 Schématisations des trains de charge

Selon le C.P.C (Cahier des Prescriptions Communes) : Règles de conception et calcul des ouvrages (Livret 2.01 de la S. N.C.F.), on a deux schémas de charges UIC 71, SW/2.

#### III.2.1.1 Modèle de charge UIC71

Le modèle de charge UIC71 représente l'effet statique du chargement vertical dû à un trafic ferroviaire standard. Les dispositions et les caractéristiques des charges verticales doivent être appliquées conformément à ce qui est présenté dans la figure III-5.

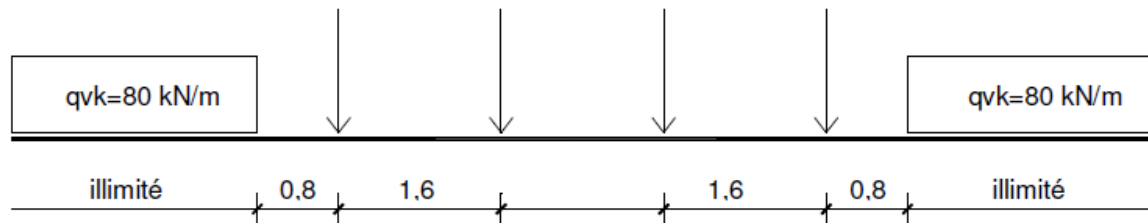


Figure III-5 : Schéma de charges UIC71

#### III.2.1.2 Modèle de charge SW/2

Le modèle SW/2, représente l'effet statique des circulations ferroviaires lourdes, La disposition des charges et les valeurs caractéristiques est indiquée à la figure III-6.

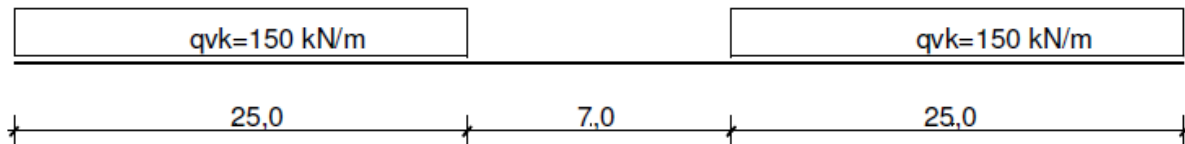


Figure III-6 : Schéma de charge SW2

### III.3 Définition des paramètres sismique de l'ouvrage

On définit les caractéristiques sismiques d'un projet d'un ouvrage d'art comme suit :

- **Zone sismique** : Notre pont est situé dans la wilaya d'Oran, en zone sismique 2a. Pour notre analyse, nous avons supposé une zone sismique plus élevée, 2b, afin de tester la performance des isolateurs sismiques sous des conditions sismiques plus sévères.
- **Site** : Le site est classé en catégorie S3 (site meuble), caractérisé par des dépôts de sables et graviers moyennement denses ou d'argile moyennement raide, avec une vitesse de propagation des ondes de cisaillement  $V_s \geq 200$  m/s à partir de 20 mètres de profondeur.
- **Classification du pont** : Nous supposons que notre pont appartient au groupe 1, ce qui en fait un pont stratégique.
- **Matériau constitutif** : notre pont est un pont mixte acier/béton. Mais on a choisi le matériau constitutif béton armé.

Le spectre de réponse a été obtenu conformément aux recommandations du RPOA. Nous avons obtenu le spectre de réponse horizontal, vertical, ainsi que le spectre de dimensionnement comme représenté dans les figures III-7 et Figure III-8.

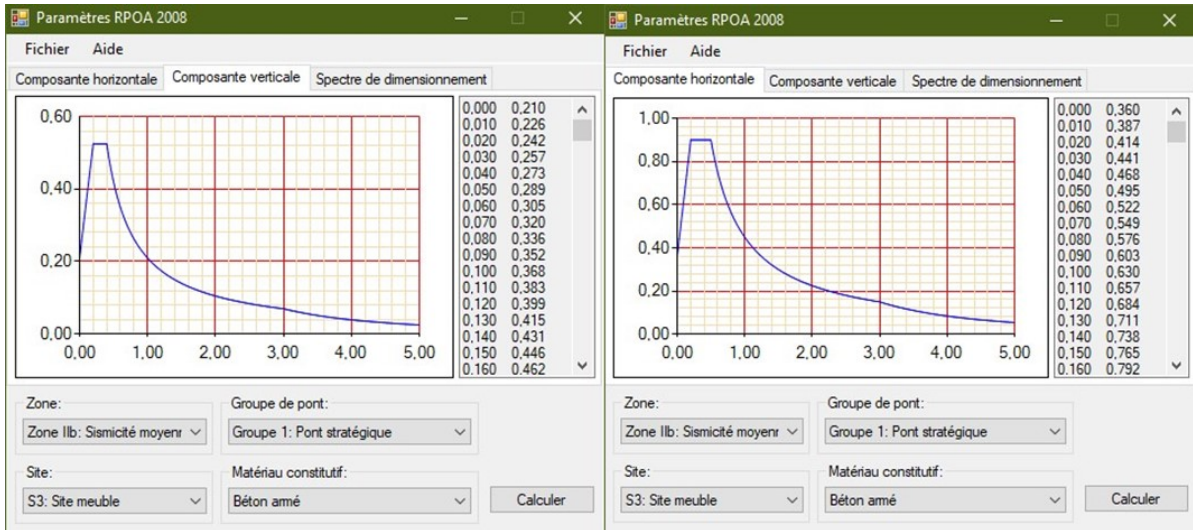


Figure III-7 : Spectre de repense élastique composante Verticale et horizontale générée par les paramètres sismique de l'ouvrage

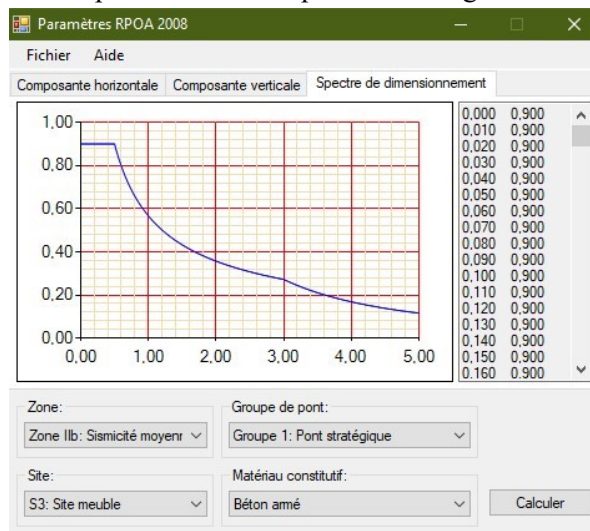


Figure III-8 : Spectre de dimensionnement

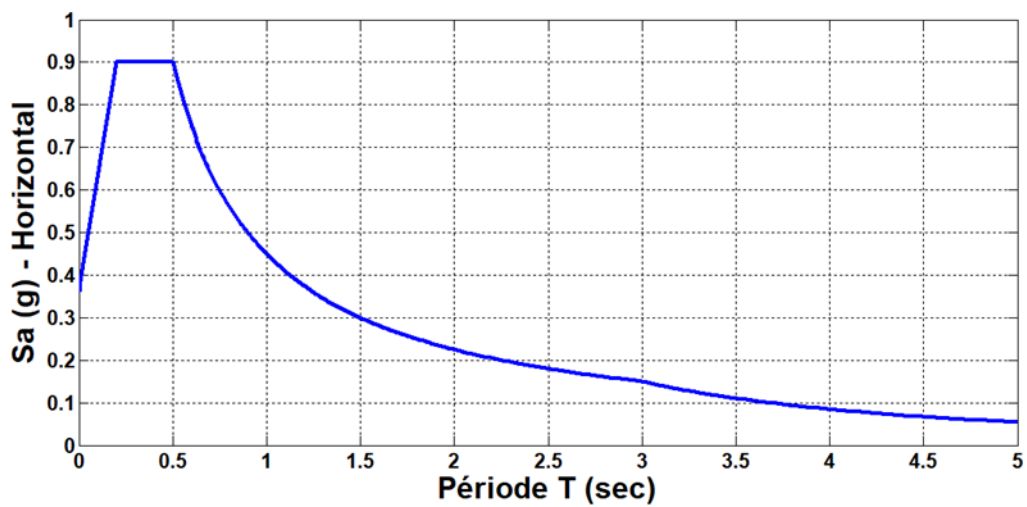


Figure III-9 : Spectre de repense horizontale

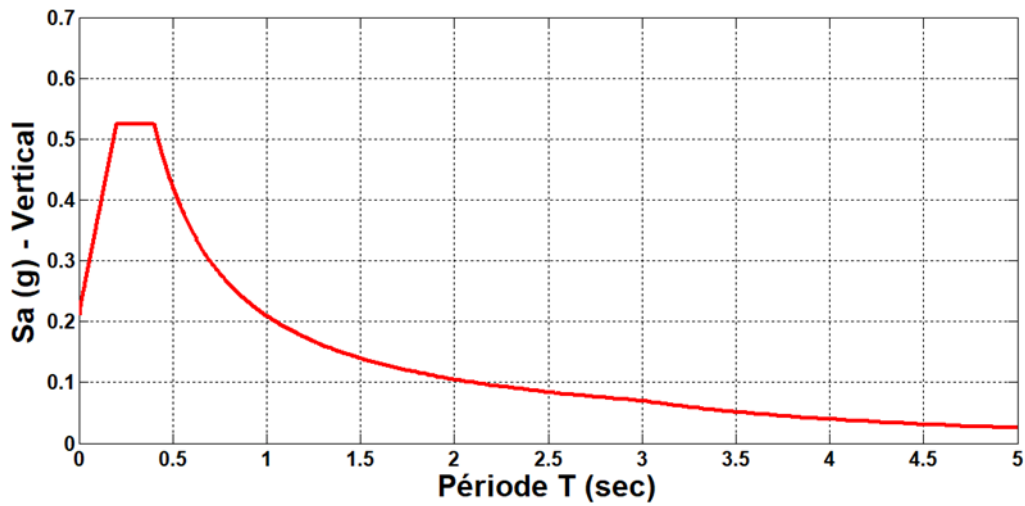


Figure III-10 : spectre de réponse verticale

### III.3.1 Accélérogramme généré par le spectre de réponse

D'après le spectre de réponse déterminé selon le RPOA, les accélérogrammes générés par le logiciel Sap2000 à partir du spectre de réponse pour les composantes horizontales et verticales en fonction du temps représentés dans la figure III-11 et la figure III-12. Ces accélérogrammes permettent d'analyser de manière précise les effets sismiques sur le pont, avec des variations temporelles des mouvements induits par un séisme et en identifiant les pics d'accélération critiques pour l'analyse.

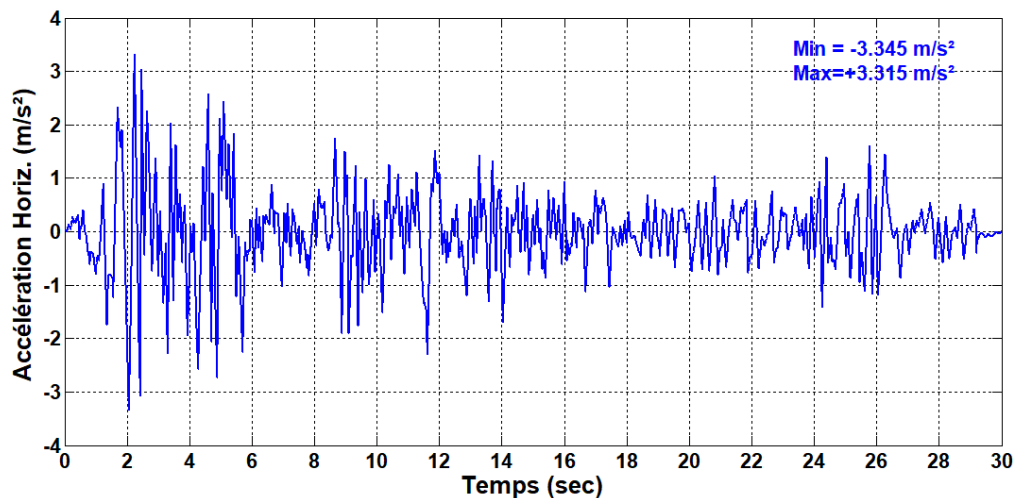


Figure III-11 : L'accélérogramme Horizontale généré à partir du spectre de réponse

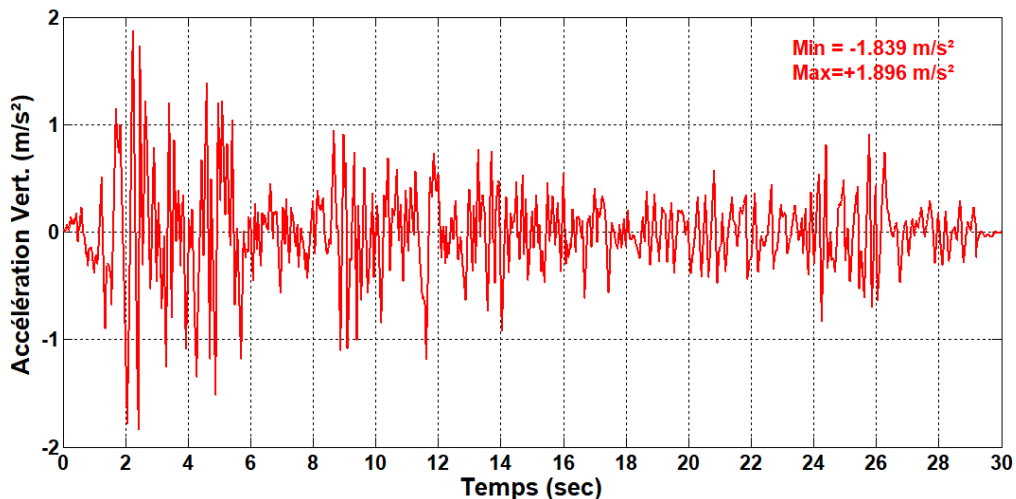


Figure III-12 : L'accélérogramme Verticale généré à partir du spectre de réponse

### **III.3.2 Les méthodes d'analyse**

En tenant compte de la zone sismique, de la géométrie du pont, des dispositifs utilisés et de son importance, différentes méthodes d'analyse peuvent être employées pour la conception sismique des ponts. Dans notre cas, nous avons choisi d'analyser le comportement sismique du pont en utilisant deux méthodes distinctes.

#### **III.3.2.1 La méthode modale spectrale**

Une approche simplifiée pour analyser le comportement sismique des ponts courants, où la charge sismique est modélisée comme une force statique appliquée au tablier dans l'une des trois directions principales (longitudinale, transversale ou verticale). Cette méthode est adaptée pour la plupart des ponts conventionnels

#### **III.3.2.2 La méthode temporelle non linéaire**

Une méthode avancée pour étudier la réponse dynamique d'une structure au cours du temps, en utilisant une intégration numérique directe des équations différentielles non linéaires du mouvement. Elle nécessite une description temporelle précise de la sollicitation sismique, basée de préférence sur des séismes réels enregistrés sur le site spécifique. Cette méthode permet d'évaluer la réponse post-élastique et les ductilités locales exigées et disponibles, mais ses résultats ne doivent pas toujours être utilisés pour réduire les exigences de conception établies par d'autres méthodes.

### **III.4 Modélisation en éléments finis**

L'étude de l'ouvrage a été modélisé par le code en éléments finis Sap2000, avec différents types d'éléments finis pour représenter les différentes parties de la structure :

- Les éléments frame pour modéliser les poutres et les piles.
- Les éléments Shell pour représenter le tablier de la structure.
- Les éléments links pour représenter les appareils d'appuis (Néoprène fretté / dispositifs FPS)

#### **III.4.1 Evaluation des charges**

Pour évaluer les charges d'exploitation et les charges permanentes, nous disposons des données suivantes :

— **Charges d'exploitation :**

UIC 71 et SW/2 : La charge uniformément répartie, comme représentée dans les figures.

— **Charges permanentes :**

Ballast (épaisseur de 0,60 m) : 18 kN/m<sup>2</sup>

Trottoir et garde-corps : 1,5 kN/m<sup>2</sup>

En outre, nous devons également prendre en compte le poids propre de la structure. Ce poids propre comprend le poids du tablier du pont, des piles, des poutres, des entretoises, ainsi que tout autre élément de la structure. Il peut être calculé en fonction des caractéristiques physiques des matériaux de construction utilisés et des dimensions de la structure.

#### **III.4.2 Masse**

Selon le RPOA, étant donné que le train est fixé à la structure du pont, les charges d'exploitation ferroviaires sont directement transférées à la structure. Ainsi, une fraction de ces charges est souvent ajoutée à la charge permanente du pont pour tenir compte de cet effet. Pour les ponts ferroviaires, cette fraction est généralement de 30% des charges d'exploitation ferroviaires.

### III.4.3 Température

Selon le DTR-RCPR, notre pont, situé dans le nord de l'Algérie, est confronté à des températures maximales pouvant atteindre  $+35^{\circ}\text{C}$  et des températures minimales descendant jusqu'à  $-15^{\circ}\text{C}$ .

### III.4.4 Modélisation des appareils d'appuis

Les dispositifs en élastomère fretté ont été définis comme des éléments link linéaires, tandis que pour les dispositifs à pendule à friction, des éléments link non linéaires (NLlink) ont été employés dans le logiciel SAP2000. Ces éléments spécifiques permettent de modéliser de manière précise le comportement non linéaire des isolateurs, en prenant en compte l'hystérésis cinématique et la non-linéarité biaxiale caractéristiques des dispositifs de pendule à friction. Leur insertion entre la sous-structure et la superstructure permet de simuler efficacement le système d'isolation, en incluant les effets de friction dans les mouvements relatifs.

Cette approche de modélisation dans le logiciel SAP2000 offre une représentation précise du comportement dynamique des structures équipées de dispositifs de pendule à friction, ce qui s'avère essentiel pour l'analyse sismique et la conception de structures résilientes aux vibrations.

### III.5 Définition des caractéristiques des appareils d'appuis en néoprène fretté

Les caractéristiques des appareils d'appuis en néoprène fretté sont les suivantes :

- Dimensions :  $700 \times 800 \times 5 \times (16+5)$  mm avec une épaisseur de 5mm.
- Module de cisaillement conventionnel (G) : 0,9 MPa.
- Module de cisaillement sismique ( $G_b$ ) : 0,99 MPa.
- Rigidité horizontale ( $K_x = K_y$ ) : 6160 kN/m.

Ces caractéristiques sont définies et illustrées comme montré dans la figure III-13 :

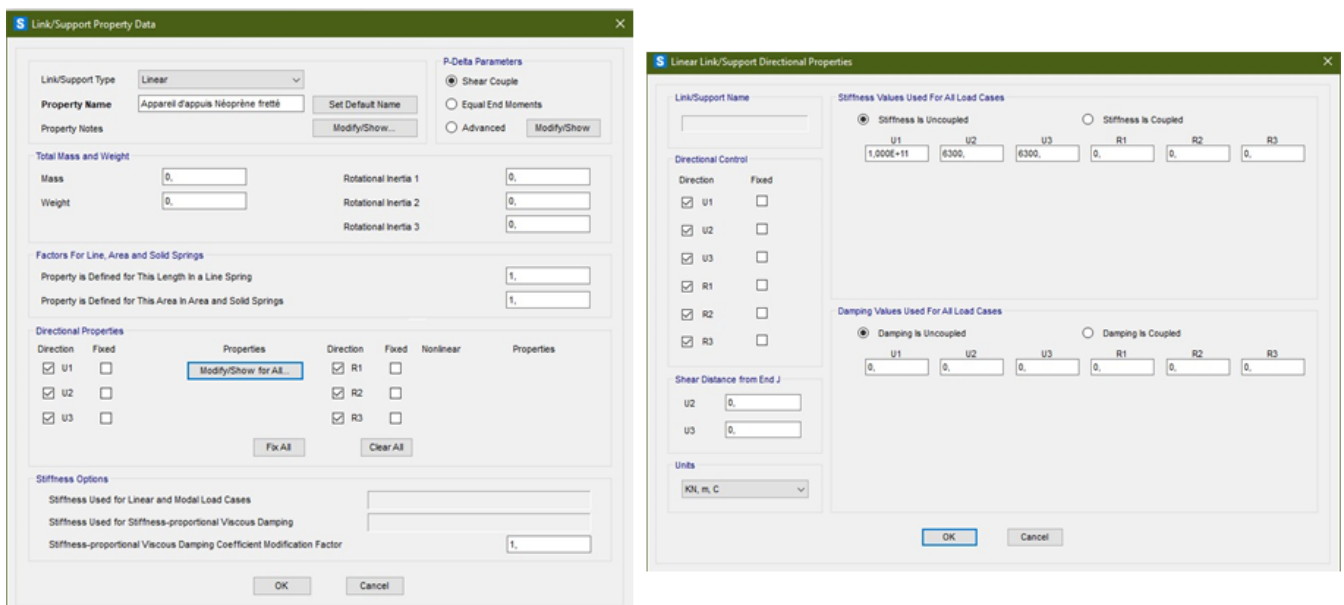


Figure III-13 : Caractéristiques des appareils d'appuis en néoprène fretté

### III.6 Définition des caractéristiques de l'isolateur à pendule à friction

Les caractéristiques fondamentales des dispositifs (FPS) sont les suivants :

- Coefficient de frottement dynamique  $\mu$
- Rayon de courbure  $R$
- Rigidité effective  $K_{eff}$
- Amortissement effectif  $\xi_{eff}$
- Période de vibration  $T$

À l'aide du logiciel Matlab, nous avons calculé les caractéristiques nécessaires pour modéliser les FPS dans SAP2000. Ces caractéristiques comprennent le taux d'amortissement, la rigidité effective, ainsi que la représentation de la courbe hystérétique, incluant la force maximale  $F_{max}$  et  $F_y$ .

Après l'exécution du programme MATLAB avec les données fournies ( $R = 3,50$  m ;  $\mu = 0,04$ ), les résultats obtenus comprennent :

- **Taux d'amortissement** : 0,31344
- **Rigidité effective** : 2666,41 kN/m
- **Courbe de comportement F- $\Delta$  de l'appareil d'appui FPS** :  
(0 m ; 0 kN) ; (0,008 m ; 117,08 kN) ; (0,126 m ; 336,9 kN)

Ces paramètres sont définis dans les directions U1, U2 et U3, comme présenté dans les figures suivantes :

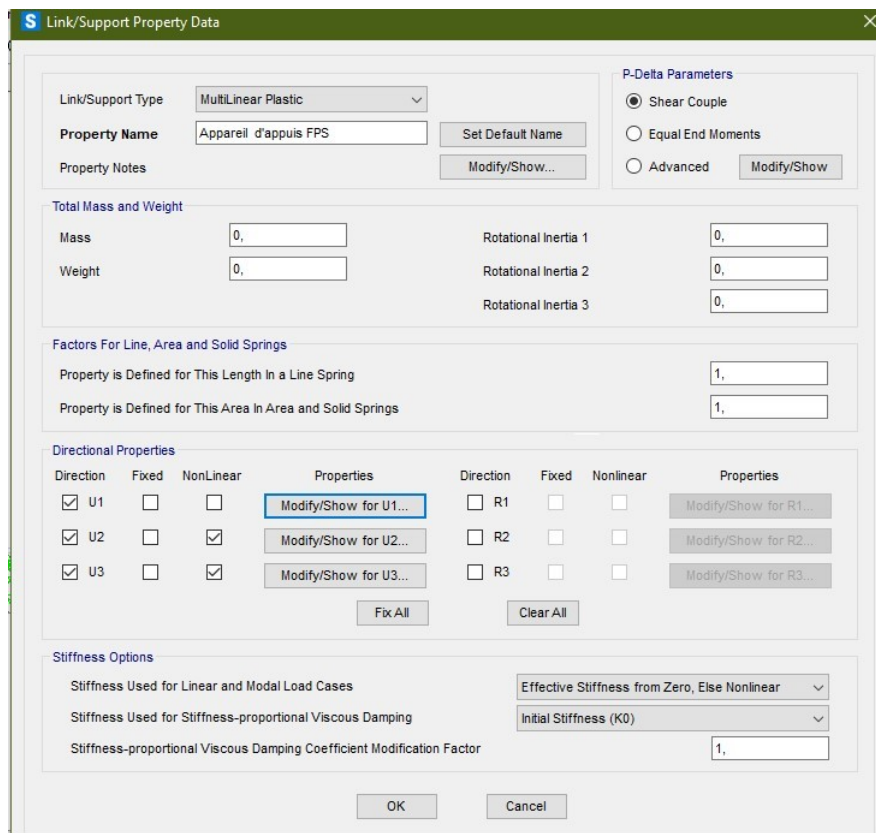


Figure III-14 : Définition des paramètres de FPS dans les directions U1, U2 et U3

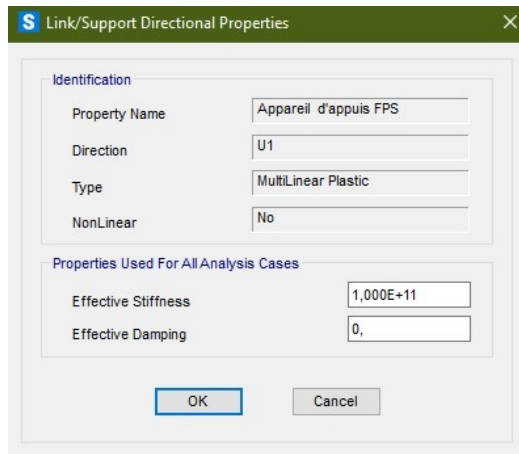


Figure III-15 : Caractéristiques de l'isolateur à pendule à friction en U1

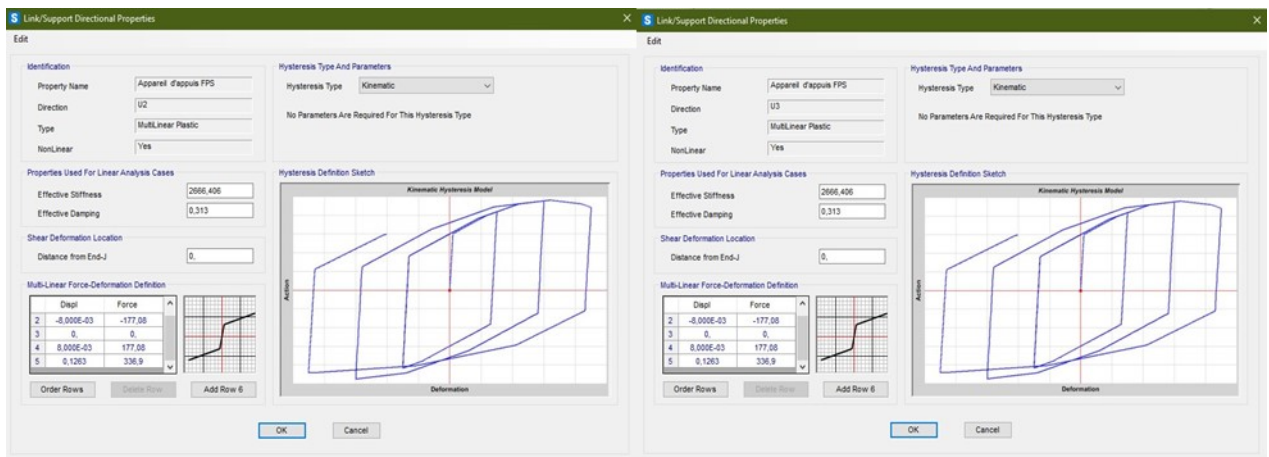


Figure III-16 : Caractéristiques de l'isolateur à pendule à friction en U2 et U3



Figure III-17 : Modèle éléments finis en 3D

### III.7 Les combinaisons de composantes de l'action sismique :

La combinaison des forces sismiques orthogonales est employée pour tenir compte de l'incertitude directionnelle du séisme et de l'effet probable de l'action maximale ELAE (l'enveloppe de l'action calculée par l'analyse modale) ainsi que ELAS (l'enveloppe de l'action calculée par l'analyse temporelle), suite à l'apparition simultanée des actions sismiques le long des axes horizontaux X et Y et de l'axe vertical Z. Ces effets peuvent être estimés à partir des actions maximales ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ) et ( $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_z$ ) dus à l'action sismique indépendante le long de chaque axe, comme suit :

— **Pour ELAE :**

ELAE = Enveloppe ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ )

$$E_1 = E_x + 0,3E_y + 0,3E_z$$

$$E_2 = E_y + 0,3E_x + 0,3E_z$$

$$E_3 = E_z + 0,3E_x + 0,3E_y$$

$E_x$ ,  $E_y$  et  $E_z$  représentent les effets des actions sismiques dans chacune des directions respectives X, Y et Z.

— **Pour ELAS :**

ELAS = Enveloppe ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ )

$$S_1 = S_x + 0,3S_y + 0,3S_z$$

$$S_2 = S_y + 0,3S_x + 0,3S_z$$

$$S_3 = S_z + 0,3S_x + 0,3S_y$$

$S_x$ ,  $S_y$  et  $S_z$  représentent les effets des actions sismiques dans chacune des directions respectives X, Y et Z.

L'analyse de la structure, en utilisant les résultats obtenus à partir des analyses modale et temporelle avec les enveloppes ELAE et ELAS, permet ainsi une évaluation complète de la réponse de la structure aux charges sismiques dans différentes directions et conditions.

Dans l'analyse modale, on identifie les modes de vibration caractéristiques de la structure et on évalue leur contribution à la réponse globale en appliquant les charges sismiques correspondant à chaque mode.

En revanche, l'analyse temporelle considère la réponse dynamique de la structure dans le temps, prenant en compte l'interaction de tous les éléments sur toute la durée de l'événement sismique. Cela permet de modéliser les effets de la masse, de la rigidité, de l'amortissement et des interactions avec le sol, offrant ainsi une vision complète de la réponse sismique de la structure dans des conditions réelles.

### III.8 Programme de l'étude

Le programme de l'étude consiste en l'utilisation de deux modèles comme nous enlustrons dans la modélisation en éléments finis : l'un avec des isolateurs FPS et l'autre sans isolateur, mais équipé de simples appareils d'appuis en néoprène fretté. L'objectif est de comparer le comportement de l'ouvrage dans ces deux configurations pour mettre en évidence l'effet des isolateurs. En utilisant SAP2000, nous avons analysé les déplacements dans les directions X et Y, ainsi que les différentes sollicitations telles que les efforts normaux, les efforts tranchants et les moments, afin de comparer les réponses de la structure avec et sans isolateur. De plus, nous avons évalué l'énergie absorbée par l'ouvrage sans isolateur et l'énergie dissipée avec les isolateurs à pendule à friction, fournissant ainsi des données essentielles pour évaluer l'efficacité des dispositifs d'isolation dans la réduction des vibrations et des effets sismiques.

Pour déterminer les déplacements, nous avons sélectionné le point situé au milieu du pont, car il représente un emplacement stratégique pour évaluer le comportement global de la structure. Quant aux sollicitations, nous avons opté pour la pile centrale, étant donné qu'elle est généralement la plus sollicitée et qu'elle offre une indication significative des charges appliquées sur l'ensemble de la structure.

### III.9 Les résultats du comportement

Cette section présente les résultats obtenus pour les deux modèles du pont : avec des isolateurs à pendule à friction (FPS) et sans isolateurs (utilisant des appuis en néoprène fretté). Nous analysons les modes propres de chaque modèle ainsi que leurs périodes, les déplacements, les sollicitations et l'énergie absorbée ou dissipée.

#### III.9.1 Modes propres et période

Pour chaque modèle, les trois modes propres ont été déterminés à partir de l'analyse modale réalisée dans SAP2000. Les périodes associées à ces modes sont essentielles pour comprendre le comportement dynamique du pont sous les charges sismiques.

Comme mentionné dans le chapitre 1, les isolateurs à pendule à friction (FPS) ont pour effet d'allonger la période propre de la structure. Ce phénomène est observé en comparant les périodes des modes propres des deux configurations : avec appuis en néoprène fretté et avec isolateurs FPS.

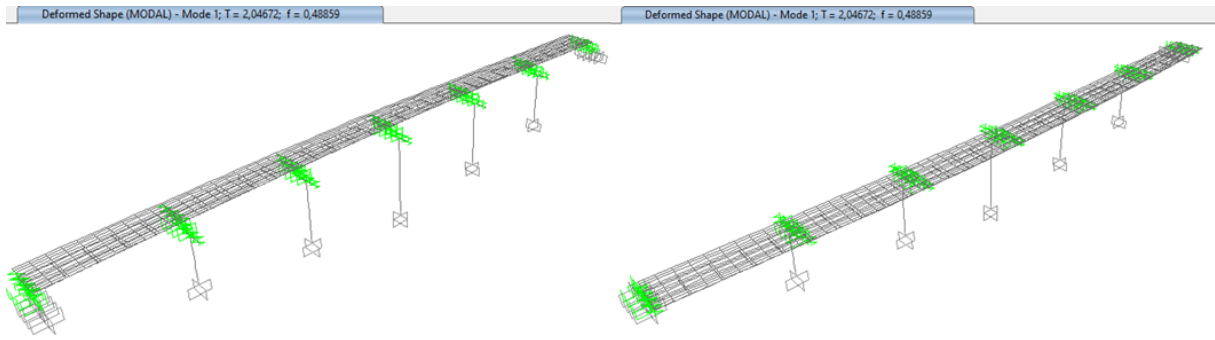
Dans le modèle avec appuis en néoprène fretté, les périodes sont plus courtes, ce qui indique une structure plus rigide et plus sensible aux vibrations de haute fréquence. En revanche, dans le modèle avec isolateurs FPS, les périodes sont plus longues, montrant que l'utilisation des isolateurs rend la structure plus flexible et moins susceptible de résonner avec les fréquences élevées des séismes. Cette augmentation des périodes propre se traduit par une meilleure dissipation de l'énergie sismique, réduisant ainsi les forces sismiques transmises à la structure et améliorant la résilience globale du pont.

Les trois périodes pour les deux modèles sont représentées dans le tableau suivant :

**Tableau III-1** : Les période propres de chaque modèle.

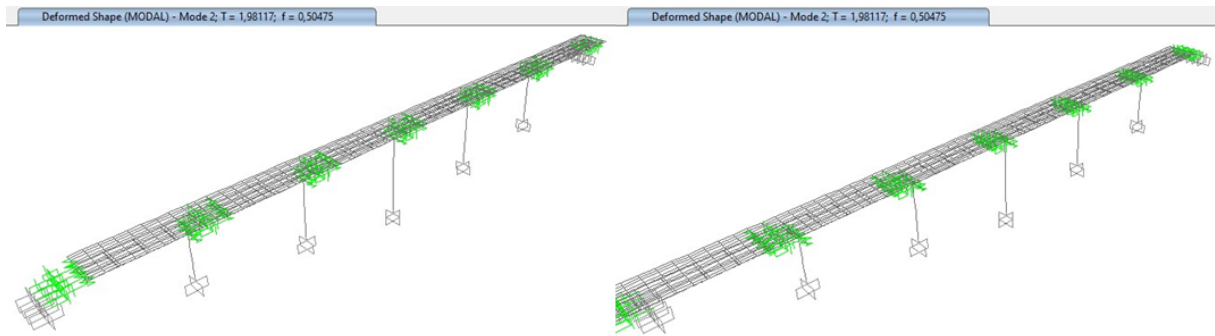
Modes propres	Périodes l'isolateur FPS	Périodes avec appuis en néoprène frette
Mode 1	2 ,046	1,169
Mode 2	1,981	1,086
Mode 3	1,721	0,948

- **Mode 01 FPS : 2,046 s**



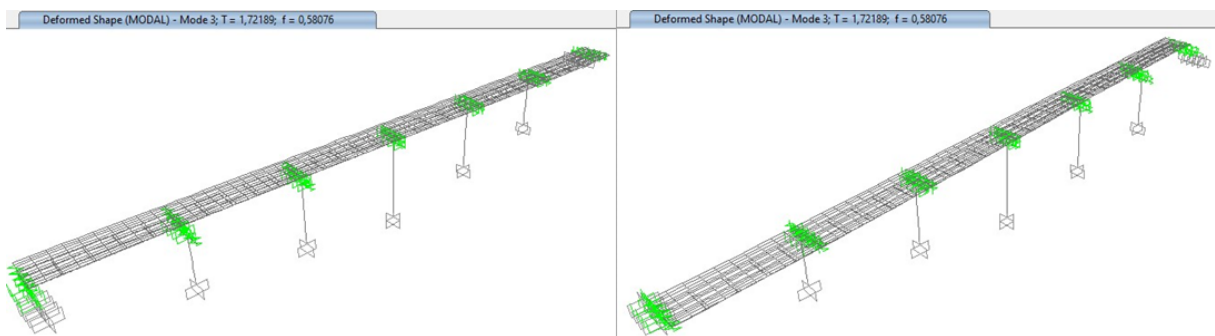
**Figure III-18 : Mode propre 01 pour le modèle en FPS**

- **Mode 02 FPS : 1,981s**



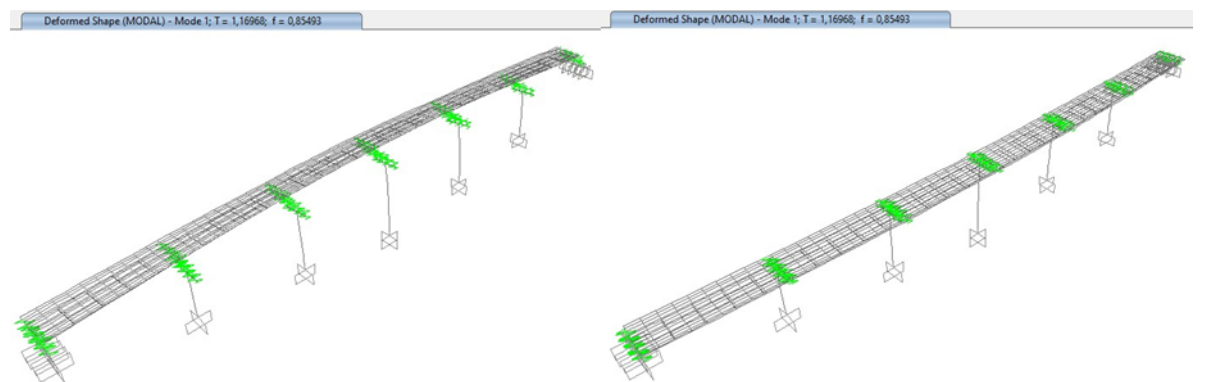
**Figure III-19 : Mode propre 02 pour le modèle en FPS**

- **Mode 03 FPS : 1,721s**



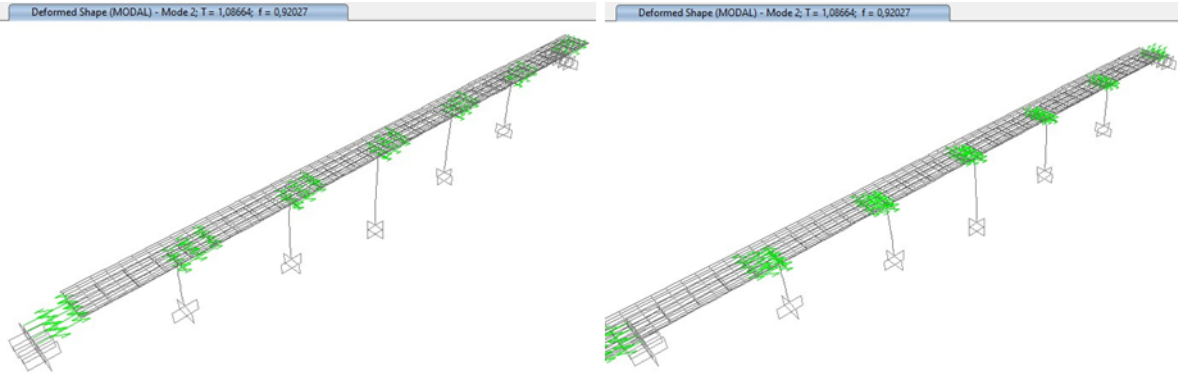
**Figure III-20 : Mode propre 03 pour le modèle en FPS**

- **Mode 01 appareil d'appuis en Néoprène fretté : 1,169 s**



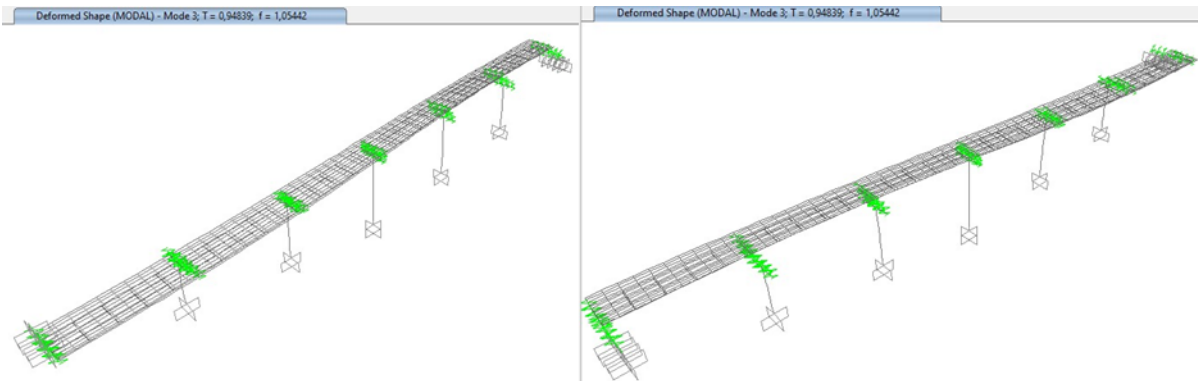
**Figure III-21 : Mode propre 01 pour le modèle en appareil d'appuis en Néoprène fretté**

- **Mode 02 appareil d'appuis en Néoprène fretté : 1,086s**



**Figure III-22** : Mode propre 02 pour le modèle en appareil d'appuis en Néoprène fretté

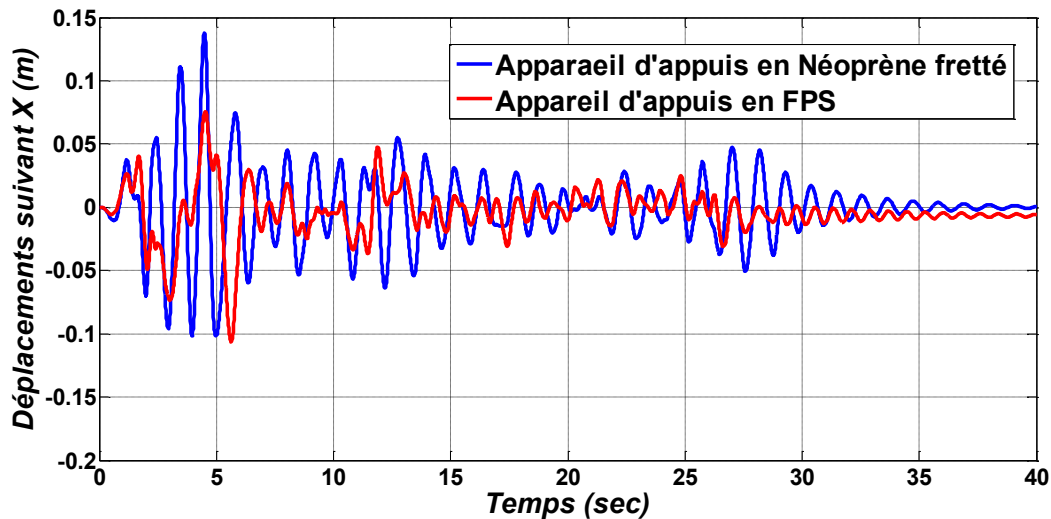
- **Mode 03 appareil d'appuis en Néoprène fretté : 0.948s**



**Figure III-23** : Mode propre 03 pour le modèle en appareil d'appuis en Néoprène fretté

### III.9.2 Déplacements

Les déplacements dans les directions X et Y ont été analysés pour les deux configurations afin de comparer la réponse de la structure avec et sans isolateurs. Le point situé au milieu du pont a été sélectionné pour cette analyse.



**Figure III-24** : La réponse temporelle du déplacement suivant X avec le temps des deux modèles

La figure III-24 montre les déplacements suivant X des deux modèles en fonction du temps. On observe que les déplacements avec les isolateurs FPS sont réduits de 45 % par rapport aux déplacements avec les appuis en néoprène fretté.

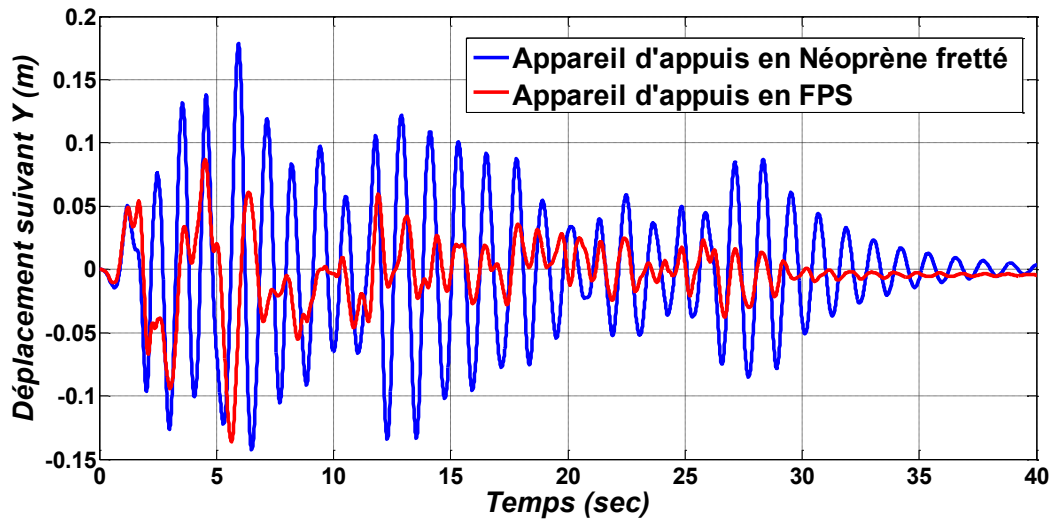


Figure III-25 : La réponse temporelle du déplacement suivant Y avec le temps des deux modèles

La figure III-25 montre les déplacements suivant Y des deux modèles en fonction du temps. On observe que les déplacements avec les isolateurs FPS sont réduits de 20 % par rapport aux déplacements avec les appuis en néoprène fretté.

Ces résultats démontrent que l'utilisation des isolateurs FPS réduit les déplacements maximaux dans les deux directions, prouvant ainsi leur efficacité à atténuer les mouvements induits par les séismes.

### III.9.3 Sollicitations

Les efforts normaux, les efforts tranchants et les moments ont été évalués pour la pile centrale, étant la plus sollicitée.

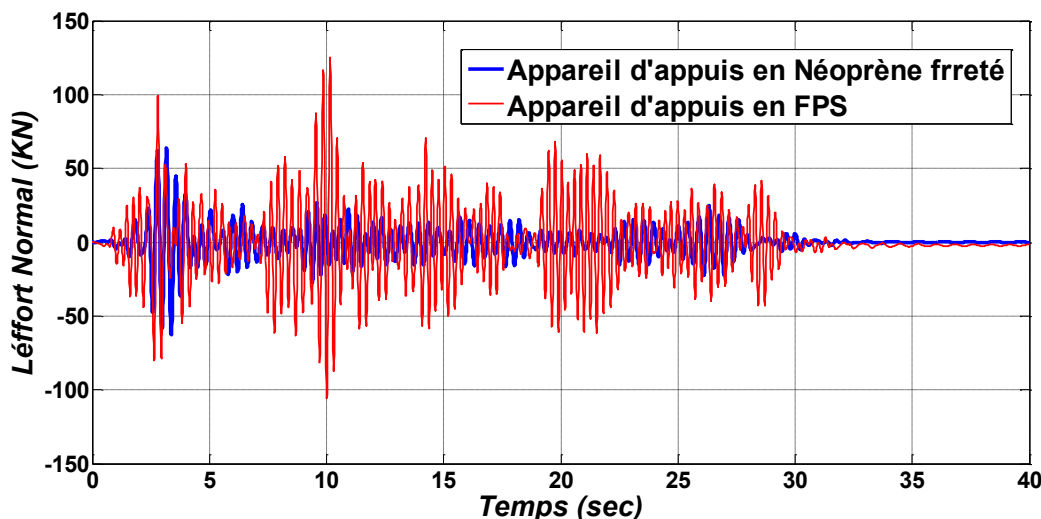


Figure III-26 : La réponse temporelle de l'effort normal N avec le temps des deux modèles

La figure III-26 montre les efforts normaux des deux modèles en fonction du temps. On observe que les efforts normaux avec les isolateurs FPS sont plus élevés que ceux avec les appuis en néoprène fretté, mais les réponses des deux modèles sont négligeables par rapport à l'effort normal de la structure due aux charges permanentes. Cela s'explique par le fait que les isolateurs FPS, en allongeant la période de la structure, modifient la distribution des efforts dans le pont, augmentant ainsi les efforts normaux pour mieux dissiper l'énergie sismique.

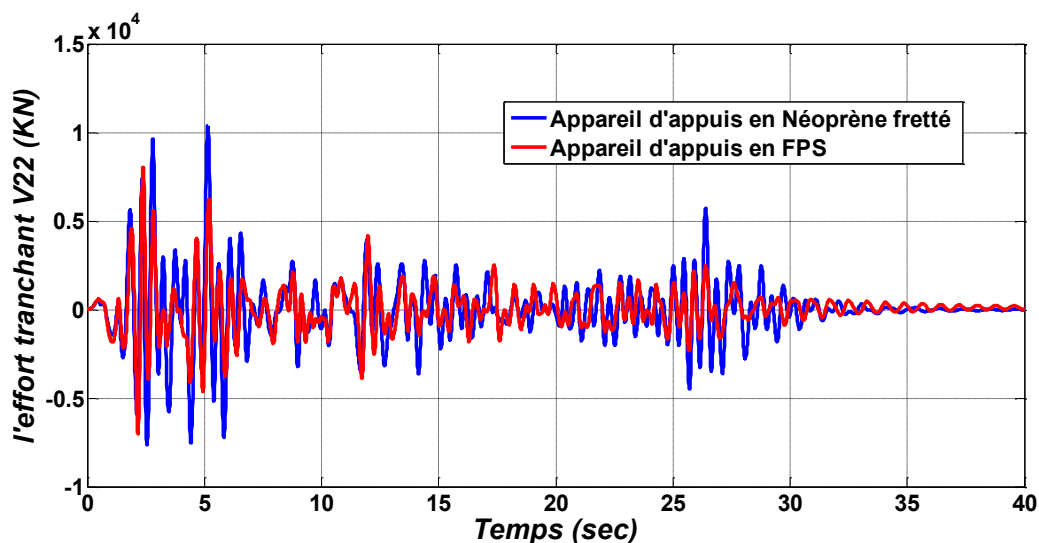


Figure III-27 : La réponse temporelle de l'effort tranchant V22 avec le temps des deux modèles

La figure III-27 illustre les efforts tranchants V22 des deux modèles en fonction du temps. On constate que les valeurs de V22 avec les isolateurs FPS sont réduites de 25 % par rapport à celles avec les appuis en néoprène fretté.

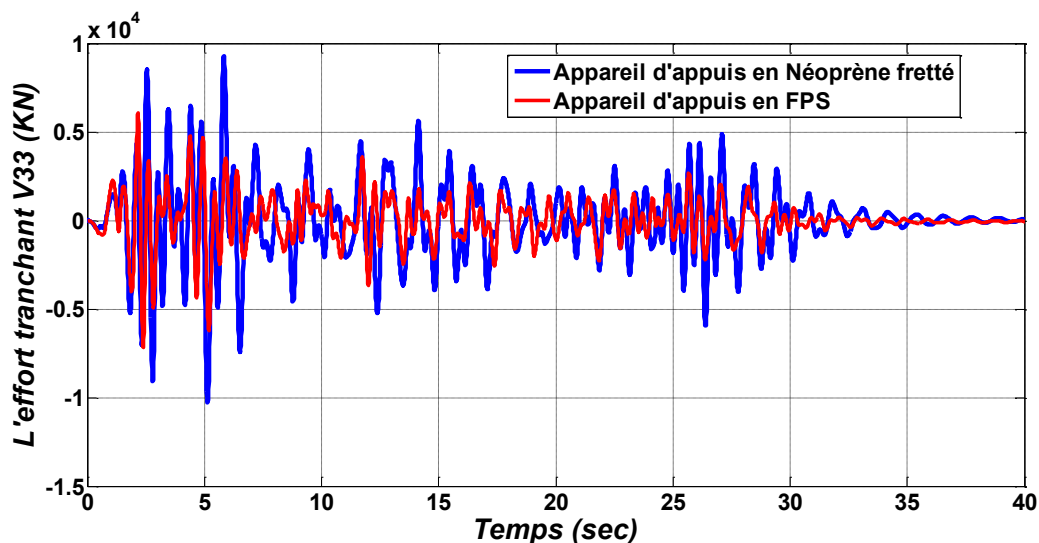


Figure III-28 : La repense temporelle de l'effort tranchant V33 avec le temps des deux modèles

De même, la figure III-28 montre les efforts tranchants V33 des deux modèles en fonction du temps. On observe que les valeurs de V33 avec les isolateurs FPS sont réduites de 34 % par rapport à celles avec les appuis en néoprène fretté.

L'utilisation des isolateurs FPS réduit efficacement les efforts tranchants sur la structure du pont. La réduction importante de ces efforts permet de diminuer les besoins en ferrailage de la structure.

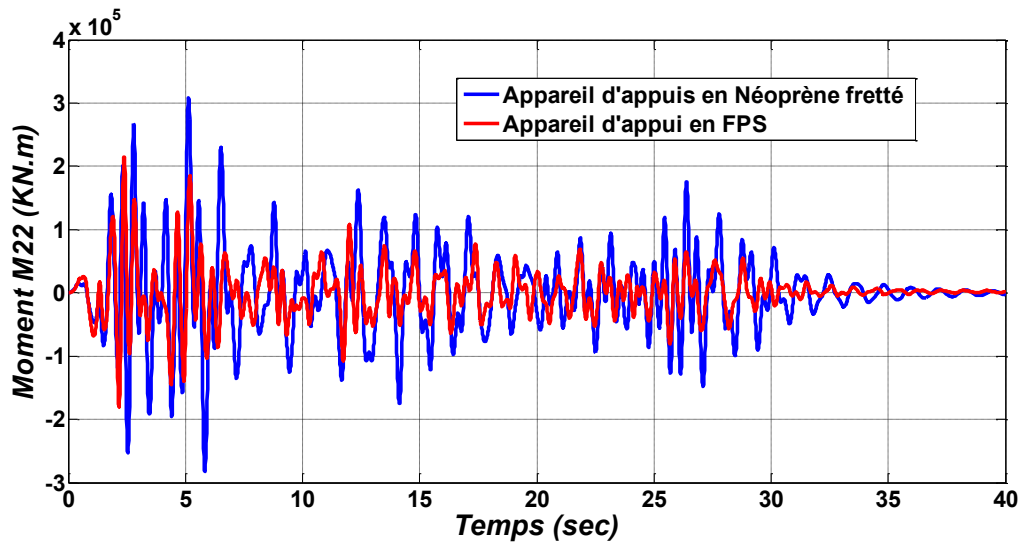


Figure III-29 : La réponse temporelle du moment M22 avec le temps des deux modèles

La figure III-29 montre les moments M22 des deux modèles sont tracés en fonction du temps. On remarque une diminution de 33 % des valeurs de M22 avec l'utilisation des isolateurs FPS par rapport à celles obtenues avec les appuis en néoprène fretté.

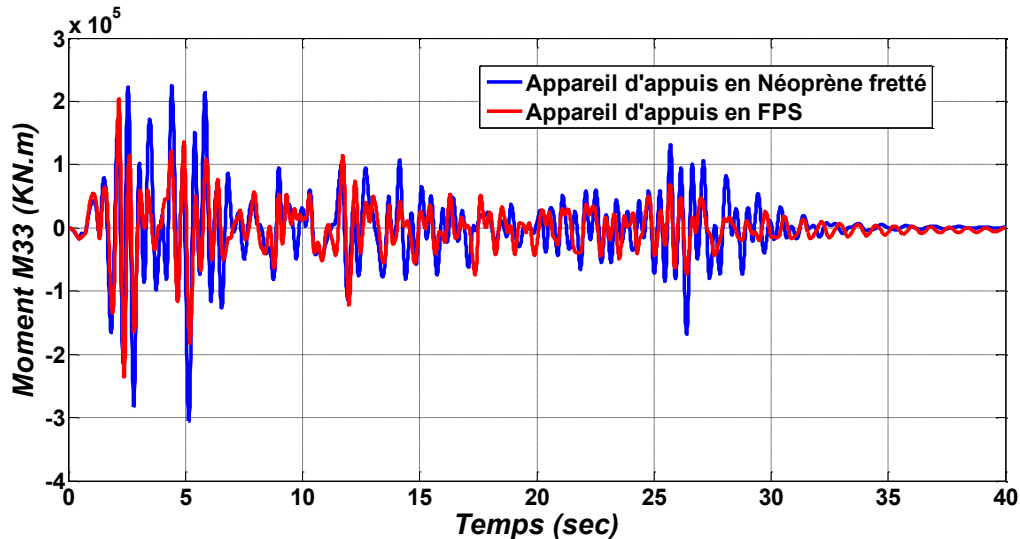


Figure III-30 : La réponse temporelle du moment M33 avec le temps des deux modèles

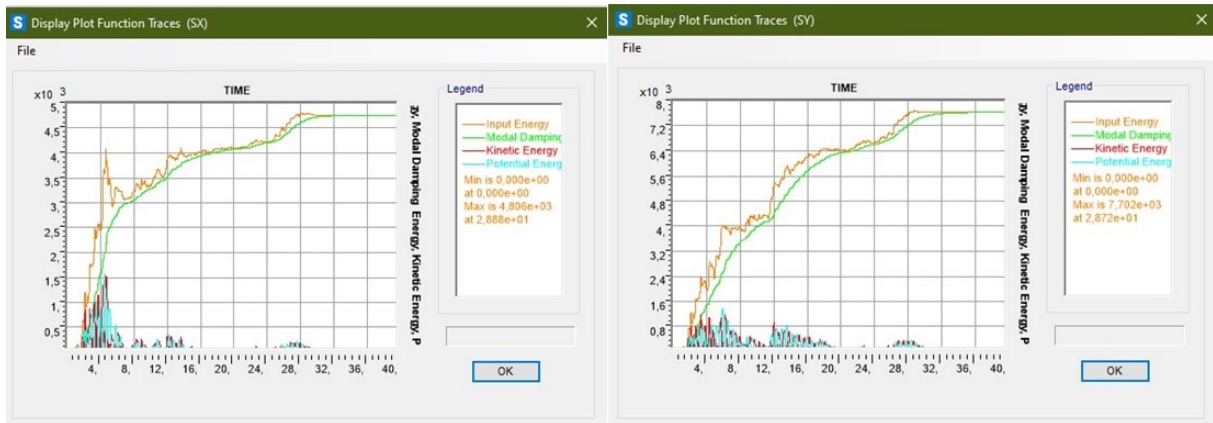
De manière similaire, la figure III-30 présente les moments M33 des deux modèles au fil du temps. On observe une réduction de 25 % des valeurs de M33 avec les isolateurs FPS par rapport à celles avec les appuis en néoprène fretté.

L'efficacité des isolateurs FPS à réduire les sollicitations par rapport au néoprène fretté est appréciable pour un ingénieur concepteur.

#### III.9.4 Énergie absorbée et dissipée

Comme mentionné dans le chapitre 1, les FPS agissent à la fois comme isolateurs et dissipateurs d'énergie. Ainsi, nous avons comparé l'énergie absorbée par l'ouvrage sans isolateurs à l'énergie dissipée par les isolateurs à pendule à friction.

##### — Cas de l'appareil d'appuis en Néoprène frette

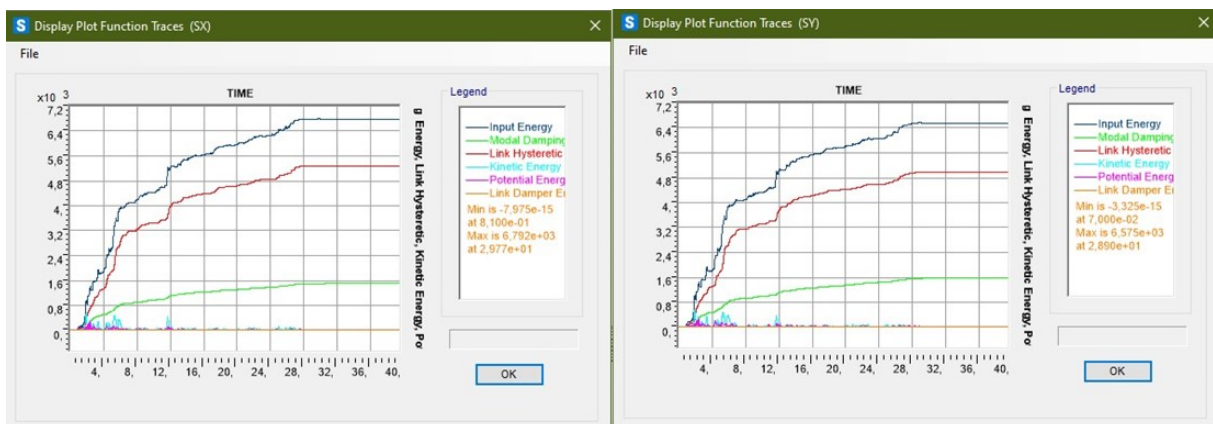


**Figure III-31** : L'énergie totale due au séisme et l'énergie absorbé par l'amortissement de l'ouvrage dans les cas d'actions sismiques Sx et Sy.

La figure III-31 représente l'énergie totale du séisme absorbée par l'ouvrage selon les directions Sx et Sy. On observe une accumulation de l'énergie totale (input energy) ainsi que de l'énergie d'amortissement (modal damping). Cela signifie que plus le séisme frappe fort, plus il y a d'énergie absorbée par l'amortissement du matériau par rapport à l'énergie totale du séisme. L'énergie potentielle (potential energy) et l'énergie cinétique (kinetic energy) représentent la différence entre l'énergie totale et l'énergie absorbée par l'amortissement du matériau due aux vibrations du séisme. En l'absence de séisme, l'énergie potentielle et l'énergie cinétique disparaissent.

On observe que l'énergie absorbée par l'amortissement de l'ouvrage est de 98% dans direction Sx et de 99% dans la direction Sy. C'est à dire absorbé par le matériau de l'ouvrage.

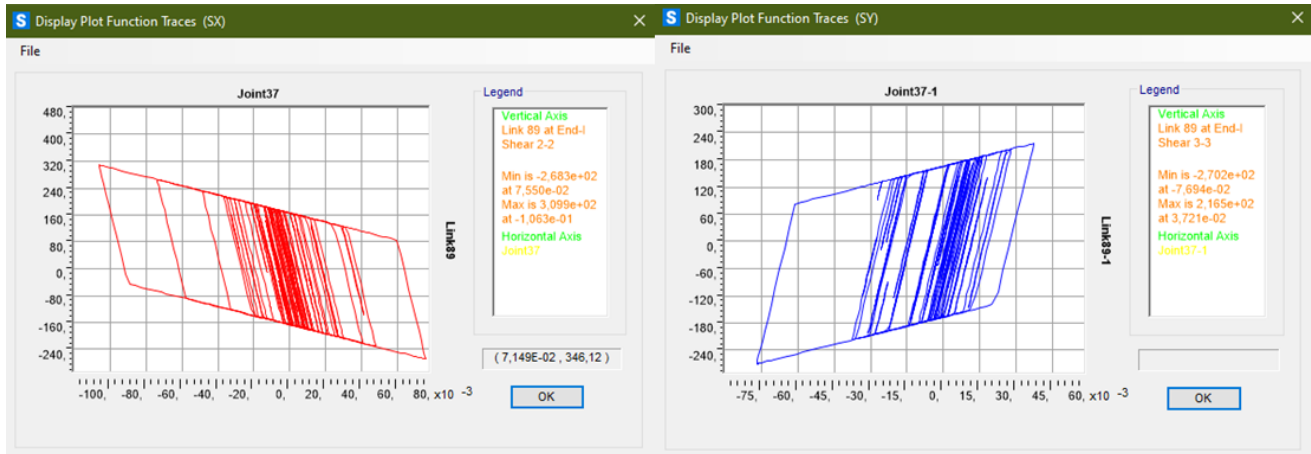
### — Cas de l'isolateur en FPS



**Figure III-32** : l'énergie totale dus au séisme dissipé l'énergie hystérétique

La figure III-32 montre l'énergie totale du séisme (input énergie) qui a été dissipée par l'énergie hystérétique des isolateurs FPS (link hysteretic), ce qui conduit à une diminution de l'énergie absorbée par l'amortissement de l'ouvrage.

On observe une dissipation d'énergie de 75% dans la direction Sx et de 77% dans la direction Sy. Cela signifie que la présence des isolateurs FPS permet une dissipation de l'énergie du séisme à travers leur comportement hystérétique, réduisant ainsi la quantité d'énergie absorbée par l'amortissement de l'ouvrage lui-même.



**Figure III-33** : La courbe hystérétique de l'appareil d'appui FPS sur la culée suivant les actions sismiques Sx et Sy

### III.10 Synthèse de résultats

A partir des résultats précédents, on peut constater ce qui suit :

- Les isolateurs FPS allongent les périodes propres, rendant la structure moins sensible aux vibrations de haute fréquence.
- Les déplacements dans les directions X et Y sont significativement réduits avec les isolateurs FPS.
- Les sollicitations, telles que les efforts tranchants et les moments fléchissant dans les piles, sont également réduites avec les isolateurs FPS.
- Les isolateurs FPS agissent comme des dissipateurs d'énergie, et diminuant l'énergie absorbée par l'ouvrage lui-même.

En synthèse, l'utilisation des isolateurs FPS améliore considérablement le comportement global de la structure en réduisant les déplacements, les sollicitations et en permettant une meilleure dissipation de l'énergie sismique. Cela démontre l'efficacité des isolateurs FPS dans la réduction des effets des séismes sur les ouvrages d'art.

### III.11 Conclusion

Ce chapitre a approfondi notre compréhension du comportement d'un pont ferroviaire face aux sollicitations sismiques, en mettant en évidence l'efficacité des appareils d'appuis à pendule à friction (FPS). En évaluant deux configurations distinctes du pont, l'une avec des FPS et l'autre avec des appuis en néoprène fretté, nous avons pu observer des différences significatives dans le comportement dynamique et sismique de la structure.

L'analyse réalisée à l'aide de la modélisation en éléments finis a révélé que l'installation des FPS allonge les périodes propres du pont, réduisant ainsi les déplacements dans les directions X et Y. De plus, les sollicitations mécaniques telles que les efforts tranchants et les moments ont été notablement diminués avec l'utilisation des FPS. Les isolateurs FPS agissent également comme des dissipateurs d'énergie, permettant de réduire l'énergie transmise à la structure lors d'un séisme.

Dans le prochain chapitre, une étude paramétrique sera réalisée pour explorer l'effet des différents paramètres des FPS et pouvoir déterminer les caractéristiques optimales de ces dispositifs. Cette analyse approfondie permettra de mieux comprendre comment ajuster les paramètres des isolateurs FPS pour maximiser leur efficacité dans la protection des ponts ferroviaires contre les séismes.

# Chapitre IV. Etude paramétrique

## IV.1 Introduction

Les isolateurs à pendule à friction fonctionnent principalement selon le principe d'un pendule. Ils se composent de surfaces en acier glissantes et d'un matériau de glissement. Les FPS permettent au pont de subir des déplacements horizontaux, fournissant une période spécifiée requise. La gravité avec la courbure de la surface de glissement agit comme une force de recentrage et ramène le pont à sa position initiale après la fin du tremblement de terre. La performance est principalement affectée par deux paramètres de conception : le rayon de courbure ( $R$ ) et le coefficient de frottement ( $\mu$ ). Les effets de recentrage sont produits par la charge verticale ( $W$ ) sur l'isolateur et le rayon de surface de glissement ( $R$ ), et la dissipation d'énergie est obtenue par le frottement dynamique entre le matériau de glissement et les surfaces courbes.

Dans notre étude, nous avons analysé l'impact du coefficient de frottement et du rayon de la surface de glissement sur le comportement du système. De plus, notre objectif était de déterminer les valeurs optimales de ces paramètres pour un système idéal.

## IV.2 Méthodologie de l'étude paramétrique

Dans cette étude, nous avons repris la modélisation du pont tel que défini dans le chapitre III et réalisé dans SAP2000. L'objectif principal est d'identifier les valeurs optimales du rayon de courbure de la surface de glissement et du coefficient de frottement. Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé deux séries de variations de paramètres :

### — Variation du Coefficient de Frottement

Pour trois valeurs de rayon de courbure de la surface de glissement ( $R$ ), nous avons fait varier le coefficient de frottement ( $\mu$ ) comme suit :

- $R = 2.0\text{m}$  :  $\mu = 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08$
- $R = 4.0\text{m}$  :  $\mu = 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08$
- $R = 6.0\text{m}$  :  $\mu = 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08$

### — Variation du Rayon de courbure de la Surface de Glissement

Pour deux valeurs distinctes de coefficient de frottement, nous avons fait varier le rayon de courbure de la surface de glissement ( $R$ ) comme suit :

- $\mu = 0.04$  :  $R = 1\text{m}, 1.5\text{m}, 2\text{m}, 2.5\text{m}, 3\text{m}, 3.5\text{m}, 4\text{m}, 4.5\text{m}, 5\text{m}, 5.5\text{m}, 6\text{m}$
- $\mu = 0.06$  :  $R = 1\text{m}, 1.5\text{m}, 2\text{m}, 2.5\text{m}, 3\text{m}, 3.5\text{m}, 4\text{m}, 4.5\text{m}, 5\text{m}, 5.5\text{m}, 6\text{m}$

### — Analyse des Paramètres avec MATLAB

Pour chaque combinaison de paramètres, nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour déterminer (voir annexe) :

- La rigidité effective.

- Le taux d'amortissement.
- La courbe correspondante à chaque variation de rayon et de coefficient de frottement

— **Paramètres Évalués :**

Les analyses se concentrent sur les réponses suivantes du modèle :

- Déplacements suivant **X**
- Déplacements suivant **Y**
- Effort normal **N<sub>max</sub>**
- Effort tranchant **V<sub>22</sub> V<sub>33</sub>**
- Moment **M<sub>22</sub> M<sub>33</sub>**

— **Méthodes d'Analyse :**

Les analyses ont été réalisées pour deux combinaisons de méthodes :

- **ELAE** : Méthode modale spectrale.
- **ELAS** : Méthode temporelle non linéaire.

Pour l'analyse des résultats maximaux, nous avons opté pour la pile centrale comme point de référence. Et pour les déplacements du tablier, nous avons sélectionné un emplacement central pour évaluer les variations.

### **IV.3 Résultats de l'analyse paramétrique**

Pour chaque ensemble de variations du rayon et du coefficient de frottement, nous avons enregistré les résultats obtenus et représenté graphiquement ces données sous forme de courbes à l'aide du logiciel MATLAB. Voici les résultats obtenus.

#### **IV.3.1 Combinaison ELAE (méthode modale spectrale)**

Dans l'analyse effectuée dans SAP2000, les résultats générés par la combinaison ELAE (méthode modale spectrale) représentent l'enveloppe des réponses spectrales modales dans les directions x, y et z pour les charges sismiques.

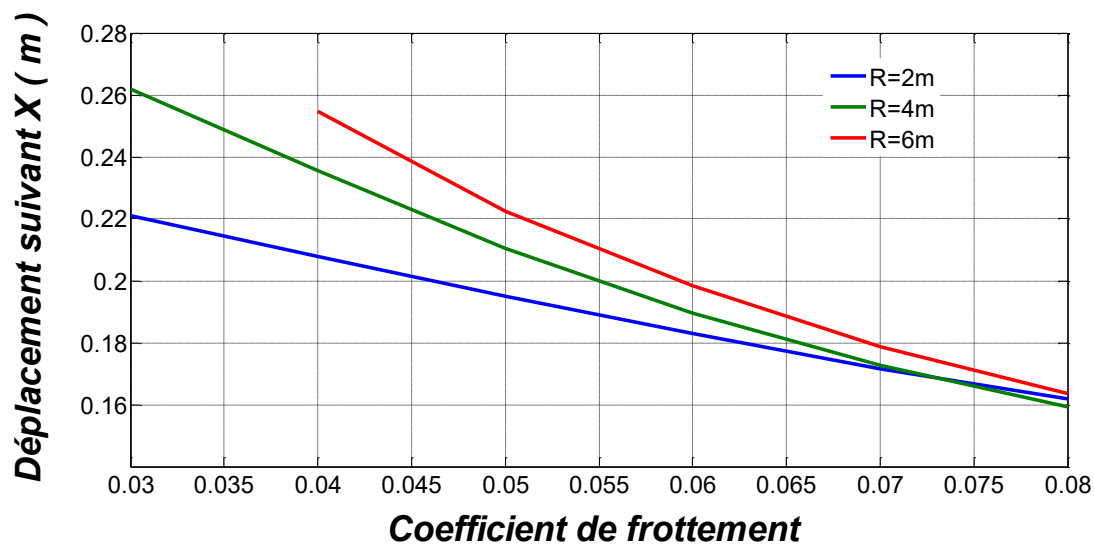
##### **IV.3.1.1 Variation de coefficient de frottement**

L'analyse paramétrique sera étudiée comme suit :

R=2.0m pour  $\mu=0.03 ; 0.04 ; 0.05 ; 0.06 ; 0.07 ; 0.08$

R=4.0m pour  $\mu=0.03 ; 0.04 ; 0.05 ; 0.06 ; 0.07 ; 0.08$

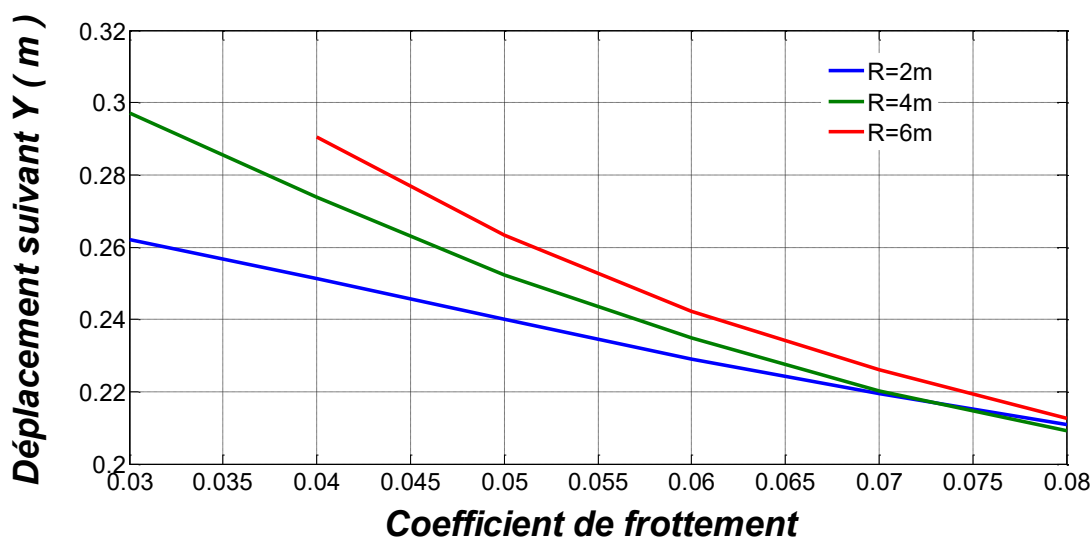
R=6.0m pour  $\mu=0.03 ; 0.04 ; 0.05 ; 0.06 ; 0.07 ; 0.08$



**Figure IV-1 :** Variation du déplacement du tablier suivant X en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons de courbures de la surface glissante

La figure IV-1 montre les variations des déplacements suivant X ( $\Delta X$ ) en fonction du coefficient de frottement  $\mu$  pour différents rayons de la surface de glissement R.

- Pour R=2m, de  $\mu=0.03$  à 0.08, on observe une diminution des déplacements ( $\Delta X$ ) de 27% lorsque le coefficient de frottement augmente.
- Pour R=4m, de  $\mu=0.03$  à 0.08, on observe une diminution des déplacements ( $\Delta X$ ) de 39% lorsque le coefficient de frottement augmente.
- Pour R=6m, de  $\mu=0.04$  à 0.08, on observe une diminution des déplacements ( $\Delta X$ ) de 36% lorsque le coefficient de frottement augmente.



**Figure IV-2 :** Variation du déplacement suivant Y en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons de courbures de la surface glissante

La figure IV-2 montre les variations des déplacements suivant Y ( $\Delta Y$ ) en fonction du coefficient de frottement  $\mu$  pour différents rayons de la surface de glissement R.

- Pour  $R=2m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on observe une diminution des déplacements ( $\Delta Y$ ) de 19% lorsque le coefficient de frottement augmente.
- Pour  $R=4m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on observe une diminution des déplacements ( $\Delta Y$ ) de 29% lorsque le coefficient de frottement augmente.
- Pour  $R=6m$ , de  $\mu=0.04$  à  $0.08$ , on observe une diminution des déplacements ( $\Delta Y$ ) de 26% lorsque le coefficient de frottement augmente.

L'impact de l'augmentation du coefficient de frottement sur les déplacements varie selon le rayon de la surface de glissement.

Globalement, une augmentation de coefficient de frottement entraîne une réduction des déplacements, mais cette diminution n'est pas uniforme pour tous les rayons. Pour les rayons plus grands la diminution est moins importante que les petits rayons.

Dans les déplacements suivant X et suivant Y, les trois courbes des différents rayons montrent que lorsque le coefficient de frottement augmente, les différences entre les déplacements diminuent. À une valeur de coefficient de frottement de  $0.08$ , les déplacements sont presque identiques. Pour les valeurs élevées du coefficient de frottement, les déplacements deviennent moins sensibles aux variations du rayon de la surface de glissement.

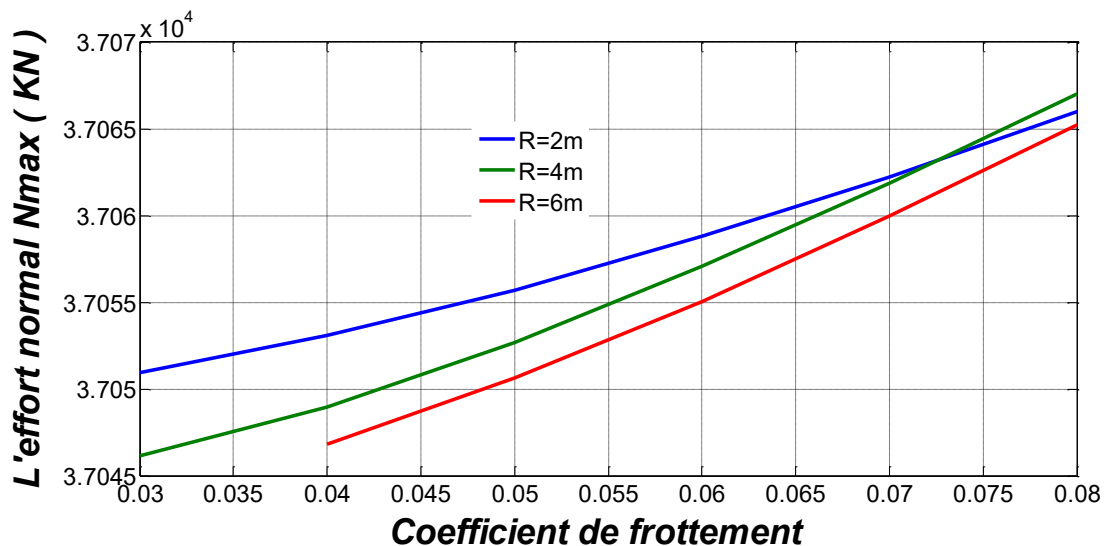


Figure IV-3 : Variation de l'effort normal  $N_{max}$  en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons de courbures de la surface glissante

La figure IV-3 représente les valeurs de  $N_{max}$  (charge maximale) en KN en fonction du coefficient de frottement  $\mu$  pour différents rayons de courbure  $R$ .

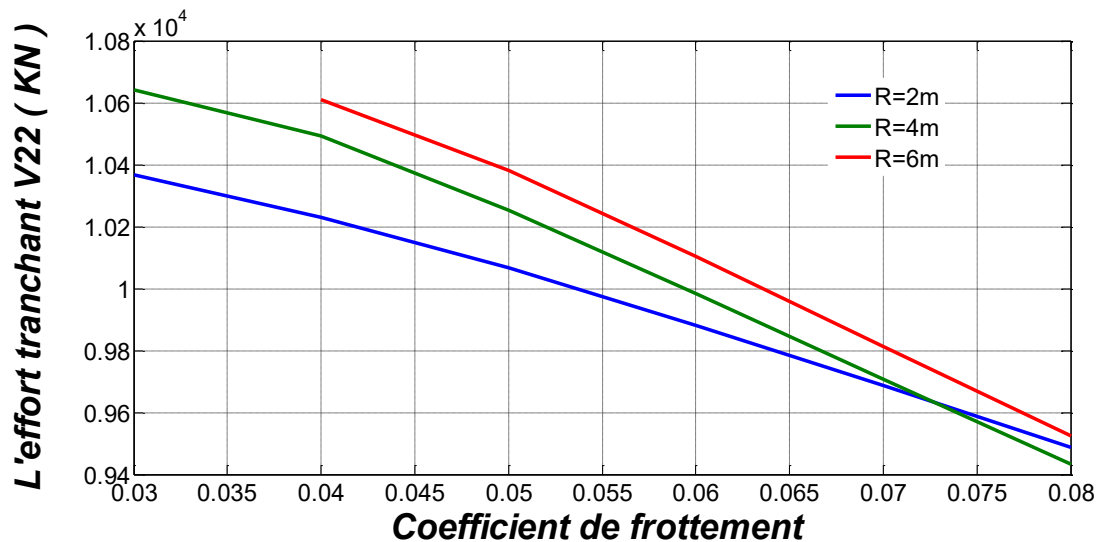
On peut observer que  $N_{max}$  augmente généralement avec l'augmentation du coefficient de frottement pour chaque valeur de rayon de la surface de glissement.

- Pour  $R=2m$ , on constate une augmentation de 0.041%.
- Pour  $R=4$ , on constate une augmentation de 0.056%.
- Pour  $R=6m$ , on constate une augmentation de 0.049%.

Cela signifie qu'un coefficient de frottement plus élevé permet de supporter des charges maximales plus importantes.

On peut remarquer que  $N_{\max}$  varie légèrement d'un rayon à l'autre. Cependant, ces variations est faibles, ce qui indique que le rayon de la surface de glissement a un effet limité sur la charge maximale supportée lorsque le coefficient de frottement change.

Globalement, ces observations signifient que le coefficient de frottement est un facteur plus important que le rayon de la surface de glissement pour supporter les charges de la superstructure du pont.



**Figure IV-4 :** Variation de l'effort tranchant  $V_{22}$  en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons de courbures de la surface glissante

La figure IV-4 présente les résultats de l'effort tranchant  $V_{22\max}$  en fonction des valeurs de coefficient de frottement  $\mu$  et le rayon de la surface de glissement  $R$ .

On voit que l'effort tranchant  $V_{22\max}$  diminue avec l'augmentation du coefficient de frottement pour chaque valeur de rayon  $R$ .

- Pour  $R=2\text{m}$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 8,50%.
- Pour  $R=4\text{m}$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 11,35%.
- Pour  $R=6\text{m}$ , de  $\mu=0.04$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 10,24%.

On peut observer aussi que, pour une valeur donnée du coefficient de frottement ( $\mu$ ), les valeurs de  $V_{22\max}$  augmentent légèrement d'un rayon à l'autre jusqu'à ce qu'elles se stabilisent avec des coefficients de frottement plus élevés.

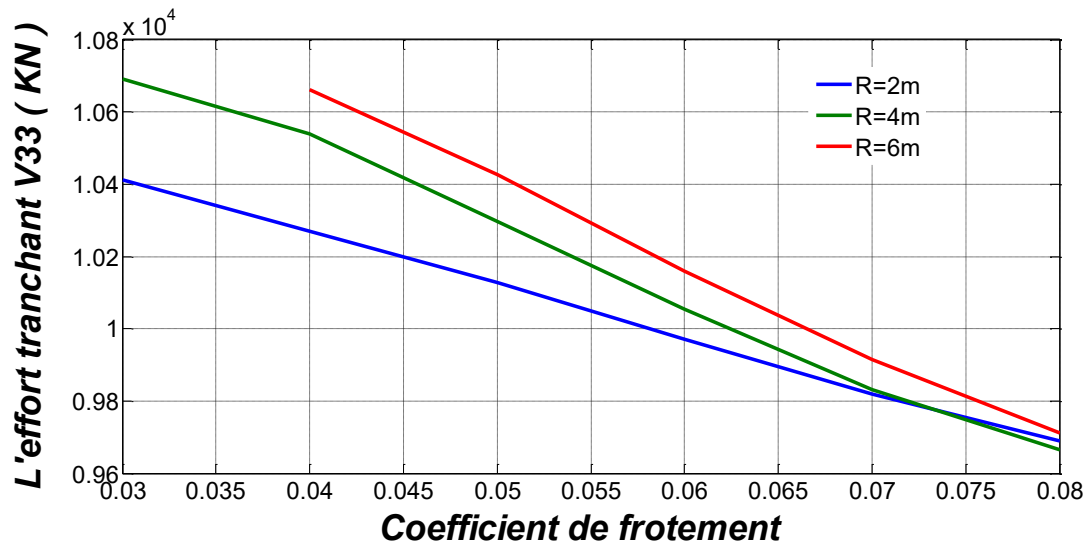


Figure IV-5 : Variation de l'effort tranchant  $V_{33}$  en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons de courbures de la surface glissante

La figure IV-5 présente les résultats de l'effort tranchant  $V_{33\text{max}}$  en fonction des valeurs de coefficient de frottement  $\mu$  et le rayon de la surface de glissement  $R$ .

On voit que l'effort tranchant  $V_{33\text{max}}$  diminue avec l'augmentation du coefficient de frottement pour chaque valeur de rayon  $R$ .

- Pour  $R=2\text{m}$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 6,94%.
- Pour  $R=4\text{m}$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 9,61%.
- Pour  $R=6\text{m}$ , de  $\mu=0.04$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 8,91%.

On peut observer aussi que, pour une valeur donnée du coefficient de frottement ( $\mu$ ), les valeurs de  $V_{33\text{max}}$  augmentent légèrement jusqu'à ce qu'elles se stabilisent avec des coefficients de frottement plus élevés.

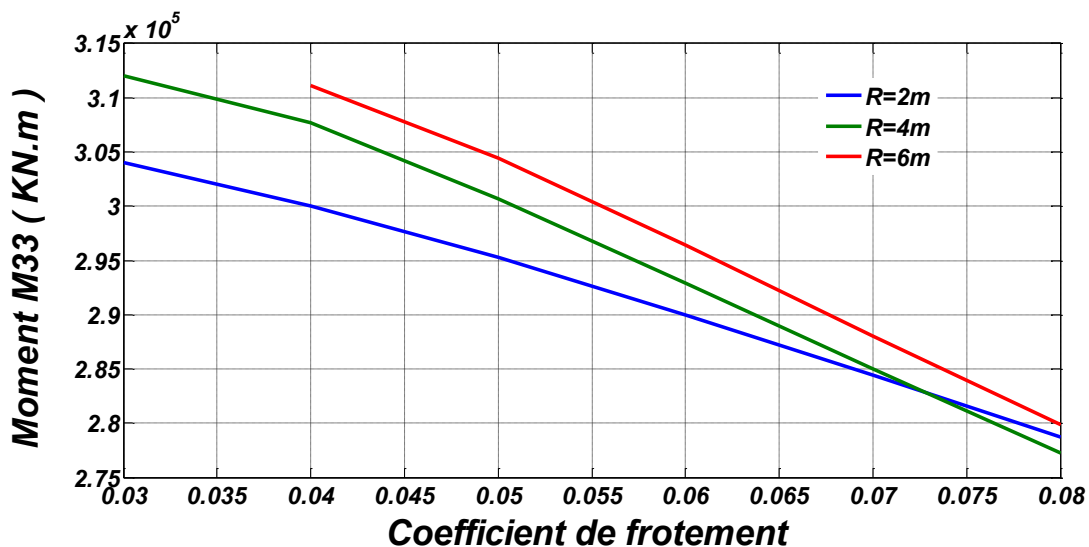


Figure IV-6 : Variation du moment  $M_{33}$  en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons de courbures de la surface glissante.

La figure IV-6 présente les résultats du Moment fléchissant  $M_{33\max}$  en fonction des valeurs de coefficient de frottement  $\mu$  et le rayon de la surface de glissement R.

On voit que le moment  $M_{33\max}$  diminue avec l'augmentation du coefficient de frottement pour chaque valeur de rayon R.

- Pour  $R=2m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 8,3%.
- Pour  $R=4m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 11,13%.
- Pour  $R=6m$ , de  $\mu=0.04$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 10,05%.

On peut constater aussi que, pour une valeur donnée du coefficient de frottement ( $\mu$ ), les valeurs  $M_{33\max}$  augmentent légèrement jusqu'à ce qu'elles se stabilisent avec des coefficients de frottement plus élevés.

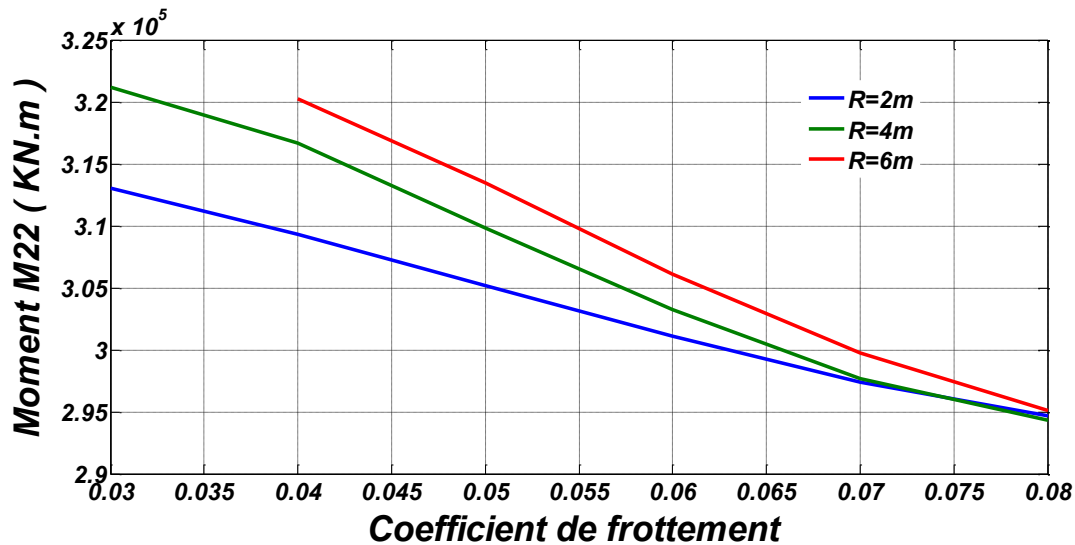


Figure IV-7 : Variation du moment  $M_{22}$  en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons de courbures de la surface glissante

La figure IV-7 présente les résultats du Moment fléchissant  $M_{22\max}$  en fonction des valeurs de coefficient de frottement  $\mu$  et le rayon de la surface de glissement R.

On peut observer que les deux directions du moment  $M_{22\max}$  et  $M_{33\max}$  sont presque similaires.

On voit que le moment  $M_{22\max}$  diminue avec l'augmentation du coefficient de frottement pour chaque valeur de rayon R.

- Pour  $R=2m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 5,86%.
- Pour  $R=4m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 8,35%.
- Pour  $R=6m$ , de  $\mu=0.04$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 7,85%.

On peut constater aussi que, pour une valeur donnée du coefficient de frottement ( $\mu$ ), les valeurs de  $M_{22\max}$  augmentent légèrement jusqu'à ce qu'elles se stabilisent avec des coefficients de frottement plus élevés.

### IV.3.1.2 Variation de Rayon de courbure de la surface de glissement

Dans cette étude, le paramètre étudié est celui du rayon de courbure  $R$  de la surface de glissement :

$\mu=0.04$  pour  $R=1\text{m}$  ;  $1.5\text{m}$  ;  $2\text{m}$  ;  $2.5\text{m}$  ;  $3\text{m}$  ;  $3.5\text{m}$  ;  $4\text{m}$  ;  $4.5\text{m}$  ;  $5\text{m}$  ;  $5.5\text{m}$  ;  $6\text{m}$

$\mu=0.06$  pour  $R=1\text{m}$  ;  $1.5\text{m}$  ;  $2\text{m}$  ;  $2.5\text{m}$  ;  $3\text{m}$  ;  $3.5\text{m}$  ;  $4\text{m}$  ;  $4.5\text{m}$  ;  $5\text{m}$  ;  $5.5\text{m}$  ;  $6\text{m}$

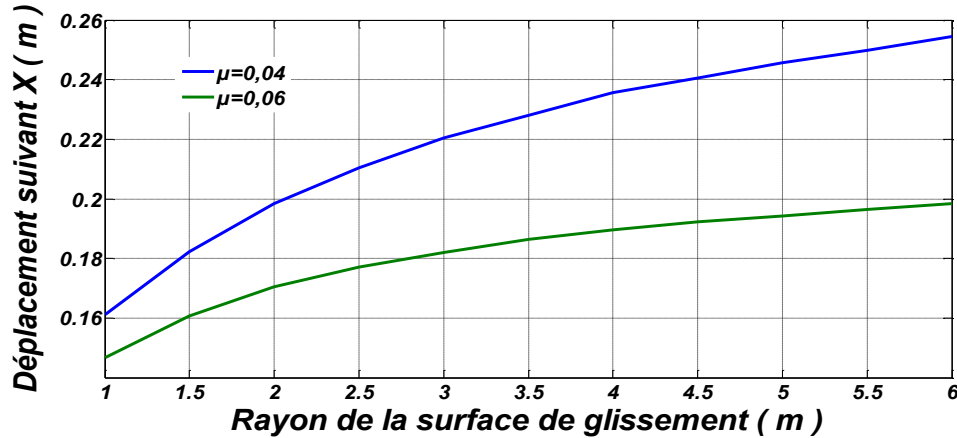


Figure IV-8 : Variation du déplacement suivant X en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement.

La figure IV-8 représente la variation des déplacements suivant X ( $\Delta X$ ) en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement  $R$  avec deux coefficients de frottement différents. On remarque une augmentation logarithmique des deux courbes.

- Pour  $\mu=0.04$ , de  $R=1\text{m}$  à  $6\text{m}$ , les déplacements augmentent de 58,04% lorsque le rayon de courbure est augmenté, cette augmentation relative diminue progressivement à mesure de l'augmentation du rayon.
- Pour  $\mu=0.06$ , de  $R=1\text{m}$  à  $6\text{m}$ , les déplacements augmentent de 35,08% lorsque le rayon de courbure est augmenté, cette augmentation relative diminue progressivement à mesure de l'augmentation du rayon.

On observe aussi à un rayon de courbure donné, les déplacements sont plus élevés pour un coefficient de frottement plus faible ; ce qui est évident.

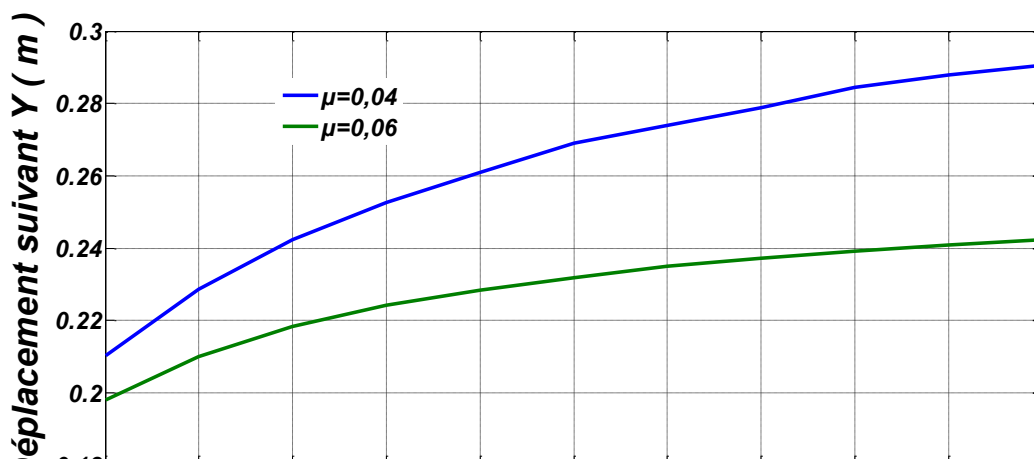


Figure IV-9 : Variation du déplacement suivant Y en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement.

La figure IV-9 représente la variation des déplacements suivant Y ( $\Delta Y$ ) en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement R avec deux coefficients de frottement différents.

On remarque une augmentation logarithmique des deux courbes

- Pour  $\mu=0.04$ , de R=1m à 6m, les déplacements augmentent de 38,18% lorsque le rayon est augmenté, mais cette augmentation relative diminue progressivement à mesure que le rayon continue d'augmenter.
- Pour  $\mu=0.06$ , de R=1m à 6m, les déplacements augmentent de 22,43% lorsque le rayon est augmenté, mais cette augmentation relative diminue progressivement à mesure que le rayon continue d'augmenter.

On observe aussi à un rayon de courbure donné, les déplacements sont plus élevés pour un coefficient de frottement plus faible.

On peut dire que pour les deux direction  $\Delta X$  et  $\Delta Y$  les coefficients de frottement plus élevés entraînent des déplacements plus faibles pour des rayons de courbure donnés. Cela implique que le système peut mieux revenir à sa position initiale après avoir été déplacé.

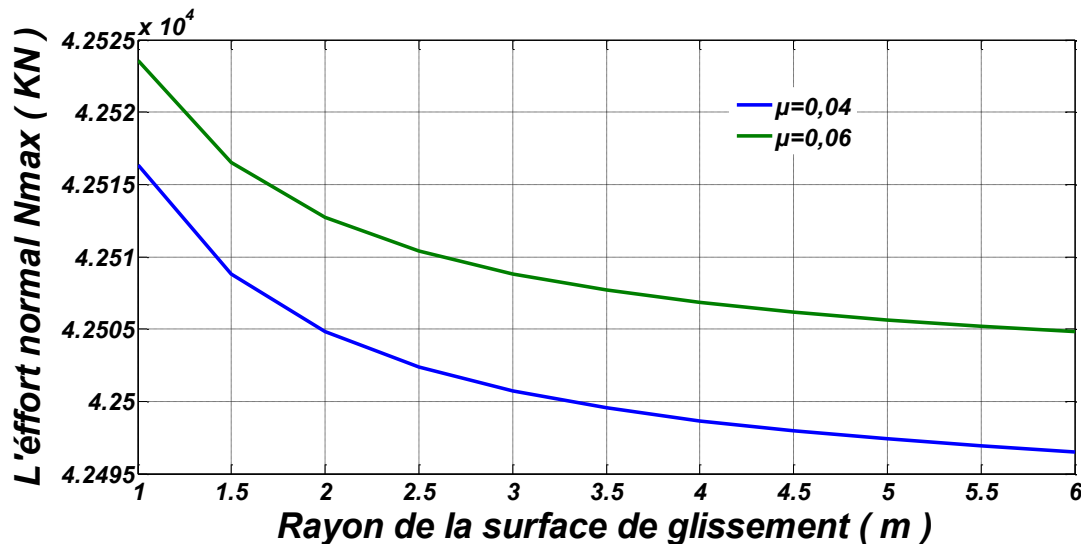


Figure IV-10 : Variation de l'effort normal  $N_{max}$  en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement.

La figure IV-10 représente les valeurs de l'effort normal  $N_{max}$  en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement R avec deux coefficients de frottement différents.

On peut observer que  $N_{max}$  diminue légèrement avec l'augmentation du rayon pour chaque valeur de coefficient de frottement.

- Pour  $\mu=0.04$ , de R=1m à 6m, les valeurs de  $N_{max}$  diminuent de 0,047% lorsque le rayon est augmenté.
- Pour  $\mu=0.06$ , de R=1m à 6m, les valeurs de  $N_{max}$  diminuent de 0,044% lorsque le rayon est augmenté.

On remarque aussi que les différences entre les valeurs de  $N_{\max}$  pour les deux coefficients de friction sont très faibles.

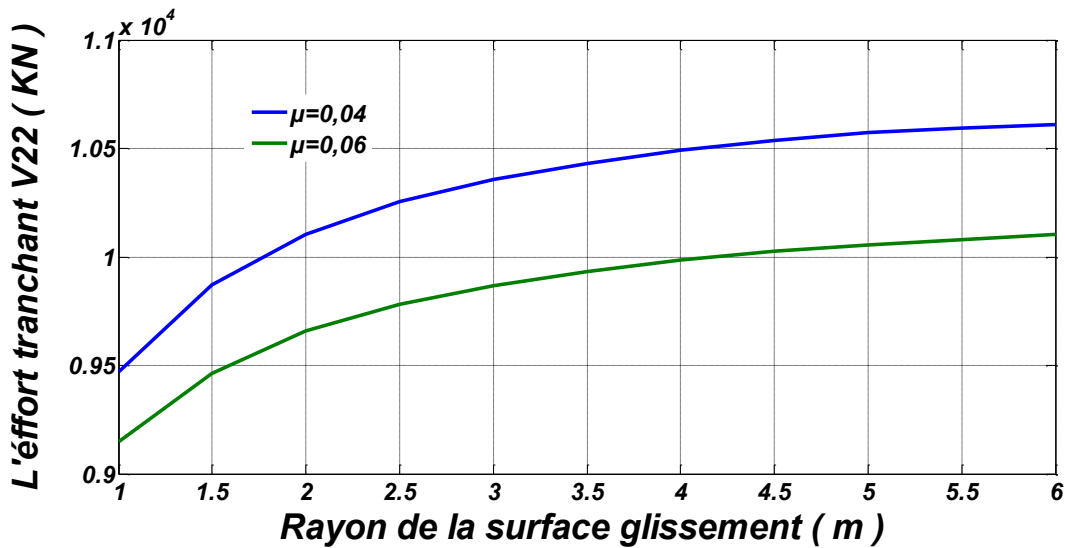


Figure IV-11 : Variation de l'effort tranchant  $V_{22}$  en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement.

La figure IV-11 représente les valeurs de L'effort tranchant  $V_{22\max}$  en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement  $R$  avec deux coefficients de frottement différents.

On observe que l'effort tranchant  $V_{22\max}$  augmente avec l'augmentation de rayon de la surface de glissement pour les deux coefficients de frottement.

- Pour  $\mu=0.04$ , de  $R=1\text{m}$  à  $6\text{m}$ , les valeurs de  $V_{22\max}$  augmentent de 12,02% lorsque le rayon est augmenté.
- Pour  $\mu=0.06$ , de  $R=1\text{m}$  à  $6\text{m}$ , les valeurs de  $V_{22\max}$  augmentent de 10,45% lorsque le rayon est augmenté.

Pour chaque valeur de rayon, on constate que l'effort tranchant diminue généralement avec l'augmentation du coefficient de frottement.

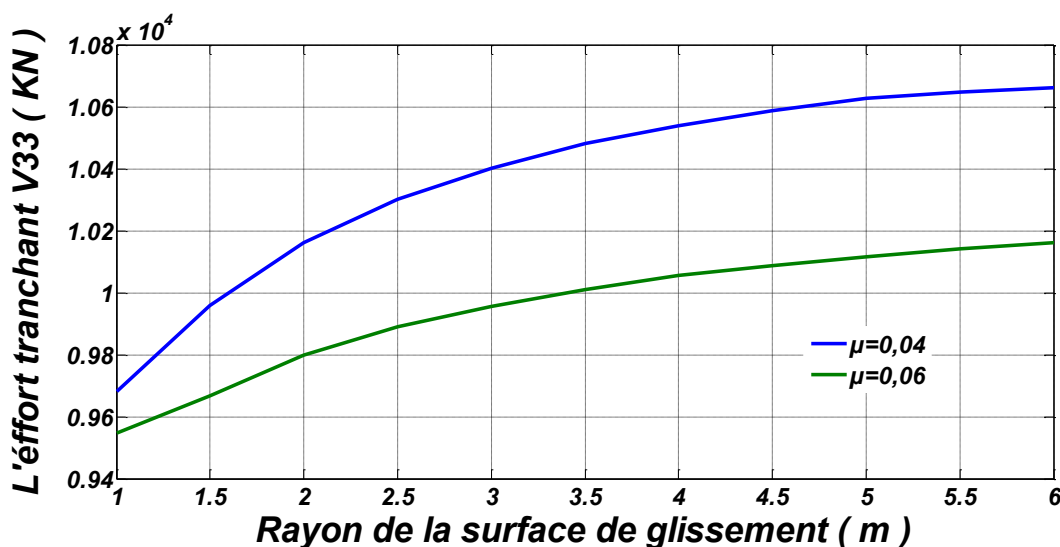


Figure IV-12 : Variation de l'effort tranchant  $V_{33}$  en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement.

La figure IV-12 représente les valeurs de L'effort tranchant  $V_{33\max}$  en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement R avec deux coefficients de frottement différents.

On observe que l'effort tranchant  $V_{33\max}$  augmente avec l'augmentation de rayon de la surface de glissement pour les deux coefficients de frottement.

- Pour  $\mu=0.04$ , de R=1m à 6m, les valeurs de  $V_{33\max}$  augmentent de 10,12% lorsque le rayon est augmenté.
- Pour  $\mu=0.06$ , de R=1m à 6m, les valeurs de  $V_{33\max}$  augmentent de 6,42% lorsque le rayon est augmenté.

Pour chaque valeur de rayon, on constate que l'effort tranchant diminue généralement avec l'augmentation du coefficient de frottement.

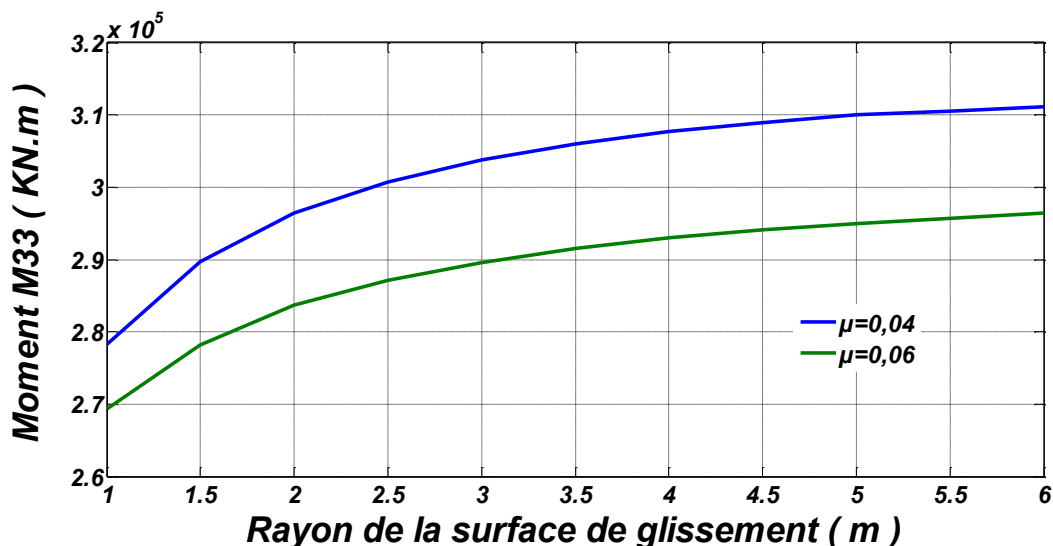


Figure IV-13 : Variation du moment  $M_{33}$  en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement.

La figure IV-13 représente les valeurs du moment  $M_{33\max}$  en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement R avec deux coefficients de frottement différents.

On observe que le moment  $M_{33\max}$  augmente avec l'augmentation de rayon de la surface de glissement pour les deux coefficients de frottement.

- Pour  $\mu=0.04$ , de R=1m à 6m, les valeurs de  $M_{33\max}$  augmentent de 11,76% lorsque le rayon est augmenté.
- Pour  $\mu=0.06$ , de R=1m à 6m, les valeurs de  $M_{33\max}$  augmentent de 10,03% lorsque le rayon est augmenté.

Pour chaque valeur de rayon, on constate que le moment diminue généralement avec l'augmentation du coefficient de frottement.

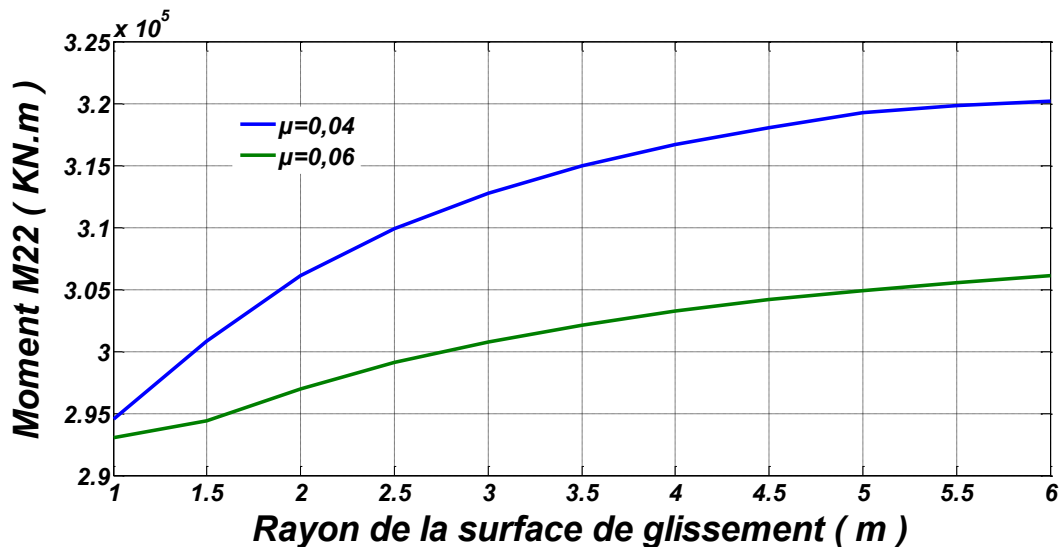


Figure IV-14 : Variation du moment  $M_{22}$  en fonction du rayon de surface de glissement pour différents coefficients de frottement.

La figure IV-14 représente les valeurs du moment  $M_{22max}$  en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement  $R$  avec deux coefficients de frottement différents.

On observe que le moment  $M_{22max}$  augmente avec l'augmentation de rayon de la surface de glissement pour les deux coefficients de frottement.

- Pour  $\mu=0.04$ , de  $R=1m$  à  $6m$ , les valeurs de  $M_{22max}$  augmentent de 8,70% lorsque le rayon est augmenté.
- Pour  $\mu=0.06$ , de  $R=1m$  à  $6m$ , les valeurs de  $M_{22max}$  augmentent de 4,45% lorsque le rayon est augmenté.

Pour chaque valeur de rayon, on constate que le moment diminue généralement avec l'augmentation du coefficient de frottement.

### IV.3.2 Combinaison ELAS (méthode d'analyse temporelle)

Pour garantir la précision des résultats, nous avons également effectué une analyse similaire en utilisant la méthode d'analyse temporelle non linéaire en utilisant le logiciel Sap2000. La combinaison ELAS représente l'enveloppe des réponses temporelles non linéaires dans les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$  pour les charges sismiques.

#### IV.3.2.1 Variation de coefficient de frottement

L'étude paramétrique porte sur les variations suivantes :

$R=2.0m$  pour  $\mu=0.03$  ; 0.04 ; 0.05 ; 0.06 ; 0.07 ; 0.08

$R=4.0m$  pour  $\mu=0.03$  ; 0.04 ; 0.05 ; 0.06 ; 0.07 ; 0.08

$R=6.0m$  pour  $\mu=0.03$  ; 0.04 ; 0.05 ; 0.06 ; 0.07 ; 0.08

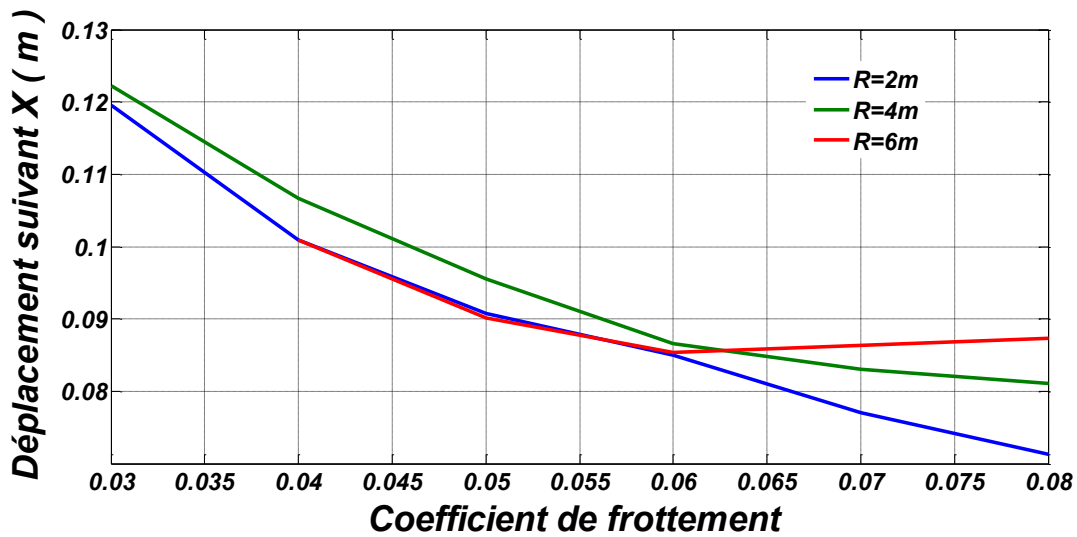


Figure IV-15 : Variation du déplacement suivant X en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons.

La figure IV-15 montre les variations des déplacements suivant X ( $\Delta X$ ) en fonction du coefficient de frottement  $\mu$  pour différents rayons de la surface de glissement R.

- Pour R=2m, de  $\mu=0.03$  à 0.08, on observe une diminution des déplacements ( $\Delta X$ ) de 40,58% lorsque le coefficient de frottement augmente.
- Pour R=4m, de  $\mu=0.03$  à 0.08, on observe une diminution des déplacements ( $\Delta X$ ) de 33,63% lorsque le coefficient de frottement augmente.
- Pour R=6m, de  $\mu=0.04$  à 0.08, on observe une diminution des déplacements ( $\Delta X$ ) de 13,47% lorsque le coefficient de frottement augmente.

Pour un coefficient de frottement donné  $\mu$ , on observe une diminution de  $\Delta X$  avec l'augmentation du rayon R. Mais cette diminution est presque négligeable lorsque  $\mu$  est plus élevé.

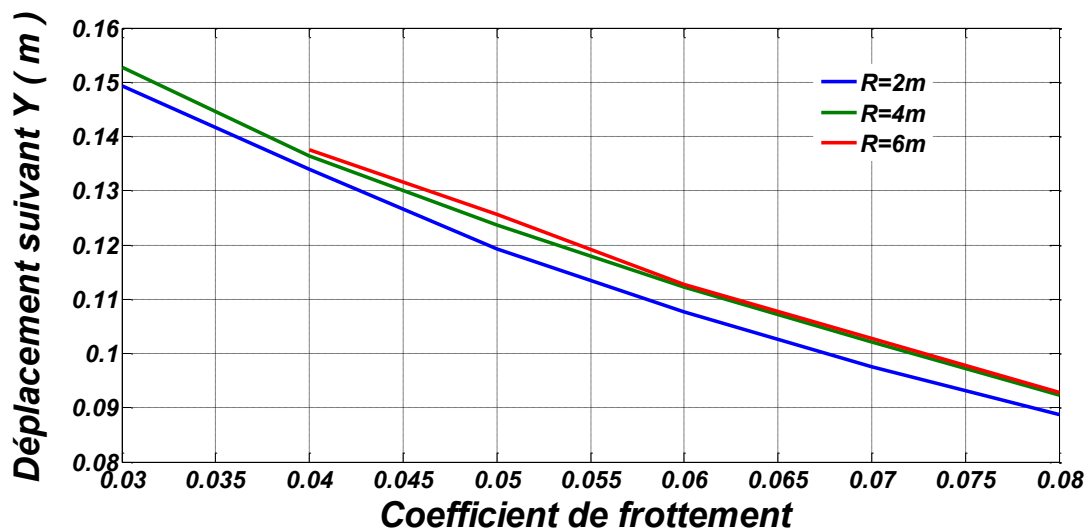


Figure IV-16 : Variation du déplacement suivant Y en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons.

La figure IV-16 montre les variations des déplacements suivant  $Y(\Delta Y)$  en fonction du coefficient de frottement  $\mu$  pour différents rayons de la surface de glissement  $R$ .

- Pour  $R=2m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on observe une diminution des déplacements ( $\Delta Y$ ) de 40,58% lorsque le coefficient de frottement augmente.
- Pour  $R=4m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on observe une diminution des déplacements ( $\Delta Y$ ) de 39,55% lorsque le coefficient de frottement augmente.
- Pour  $R=6m$ , de  $\mu=0.04$  à  $0.08$ , on observe une diminution des déplacements ( $\Delta Y$ ) de 32,26% lorsque le coefficient de frottement augmente.

Pour un coefficient de frottement donné  $\mu$ , on observe une diminution de  $\Delta Y$  avec l'augmentation du rayon  $R$ . Mais cette diminution est presque négligeable lorsque  $\mu$  est plus élevé.

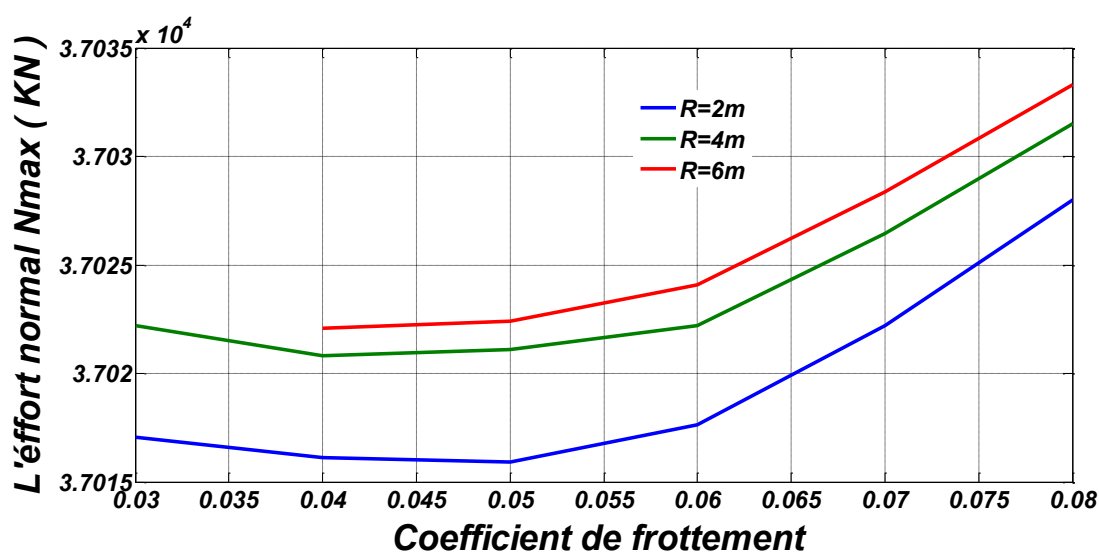


Figure IV-17 : Variation de l'effort normal  $N_{max}$  en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons.

La figure IV-17 représente les valeurs de  $N_{max}$  (charge maximale) en fonction du coefficient de frottement  $\mu$  pour différents rayons de courbure  $R$ .

On peut observer une diminution initiale légère de  $N_{max}$ , suivie d'une augmentation avec l'augmentation du coefficient de frottement pour chaque valeur de rayon de la surface de glissement.

- Pour  $R=2m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une légère diminution jusqu'à ce qu'il atteigne  $\mu=0.05$ . Puis, une augmentation de 0.029 %.
- Pour  $R=4m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une légère diminution jusqu'à ce qu'il atteigne  $\mu=0.04$ . Puis, une augmentation de 0.025%.
- Pour  $R=6m$ , de  $\mu=0.04$  à  $0.08$ , on constate une augmentation de 0.03%.

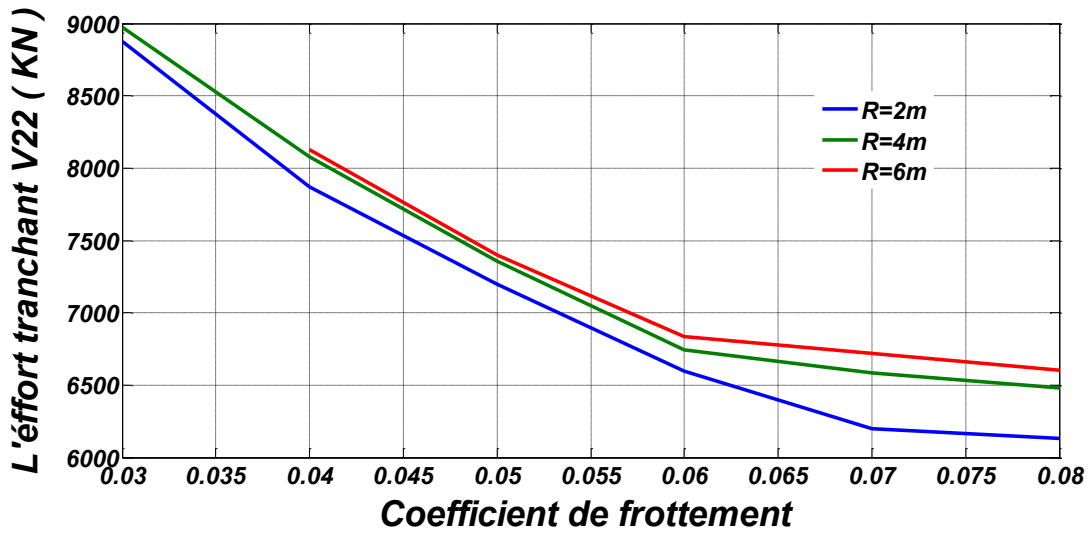


Figure IV-18: Variation de l'effort tranchant  $V_{22}$  en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons.

La figure IV-18 présente les résultats de l'effort tranchant  $V_{22max}$  en fonction des valeurs de coefficient de frottement  $\mu$  et le rayon de la surface de glissement R.

On voit que l'effort tranchant  $V_{22max}$  diminue avec l'augmentation du coefficient de frottement pour chaque valeur de rayon R.

- Pour R=2m, de  $\mu=0.03$  à 0.08, on constate une diminution de 30,88%.
- Pour R=4m, de  $\mu=0.03$  à 0.08, on constate une diminution de 11,35%.
- Pour R=6m, de  $\mu=0.04$  à 0.08, on constate une diminution de 10,24%.

On peut observer aussi que, pour une valeur donnée du coefficient de frottement ( $\mu$ ), les valeurs de  $V_{22max}$  augmentent légèrement pour chaque valeur de R.

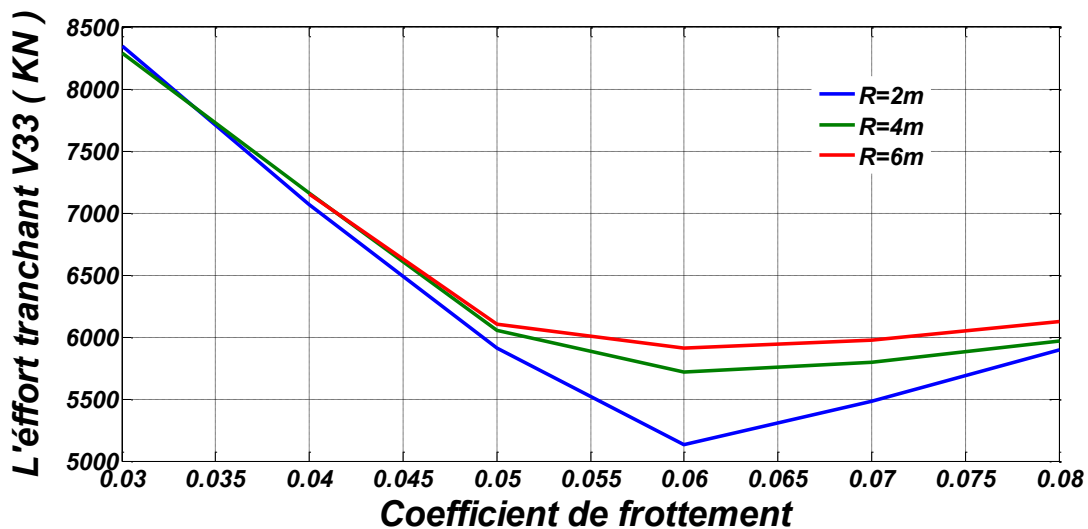


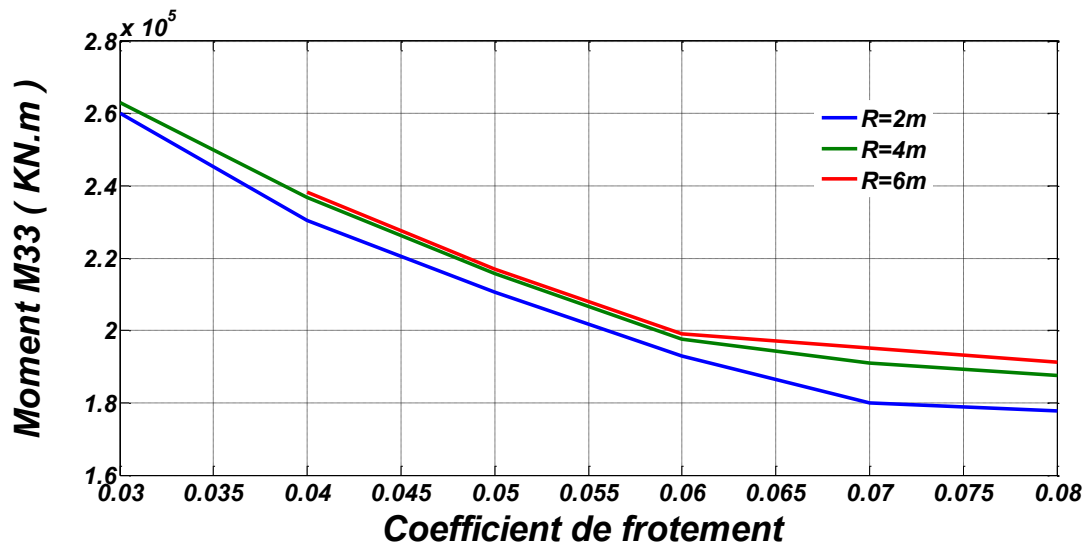
Figure IV-19: Variation de l'effort tranchant  $V_{33}$  en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons.

La figure IV-19 présente les résultats de l'effort tranchant  $V_{33\max}$  en fonction des valeurs de coefficient de frottement  $\mu$  et le rayon de la surface de glissement  $R$ .

On voit une diminution initiale de l'effort tranchant  $V_{33\max}$ , puis une augmentation avec l'augmentation du coefficient de frottement pour chaque valeur de rayon  $R$ .

- Pour  $R=2m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution initiale, mais à partir de  $\mu=0.06$  il commence à augmenter légèrement
- Pour  $R=4m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution initiale, mais à partir de  $\mu=0.06$  il commence à augmenter légèrement
- Pour  $R=6m$ , de  $\mu=0.04$  à  $0.08$ , on constate une diminution initiale, mais à partir de  $\mu=0.06$  il commence à augmenter de façon plus importante que  $R=2m$  et  $R=4m$ .

On peut observer aussi que, pour une valeur donnée du coefficient de frottement ( $\mu$ ), les valeurs de  $V_{33\max}$  sont similaires jusqu'à ce qu'elles commencent d'augmenter légèrement dans la valeur  $\mu=0.05$ , puis elles reviennent presque similaires à  $\mu=0.08$ .



**Figure IV-20 :** Variation du moment  $M_{33}$  en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons.

La figure IV-20 présente les résultats du Moment fléchissant  $M_{33\max}$  en fonction des valeurs de coefficient de frottement  $\mu$  et le rayon de la surface de glissement  $R$ .

On voit que le moment  $M_{33\max}$  diminue avec l'augmentation du coefficient de frottement pour chaque valeur de rayon  $R$ .

- Pour  $R=2m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 31,66%.
- Pour  $R=4m$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 28%.
- Pour  $R=6m$ , de  $\mu=0.04$  à  $0.08$ , on constate une diminution de 19,69%.

On peut constater aussi que, pour une valeur donnée du coefficient de frottement ( $\mu$ ), les valeurs  $M_{33\max}$  augmentent avec l'augmentation de rayon.

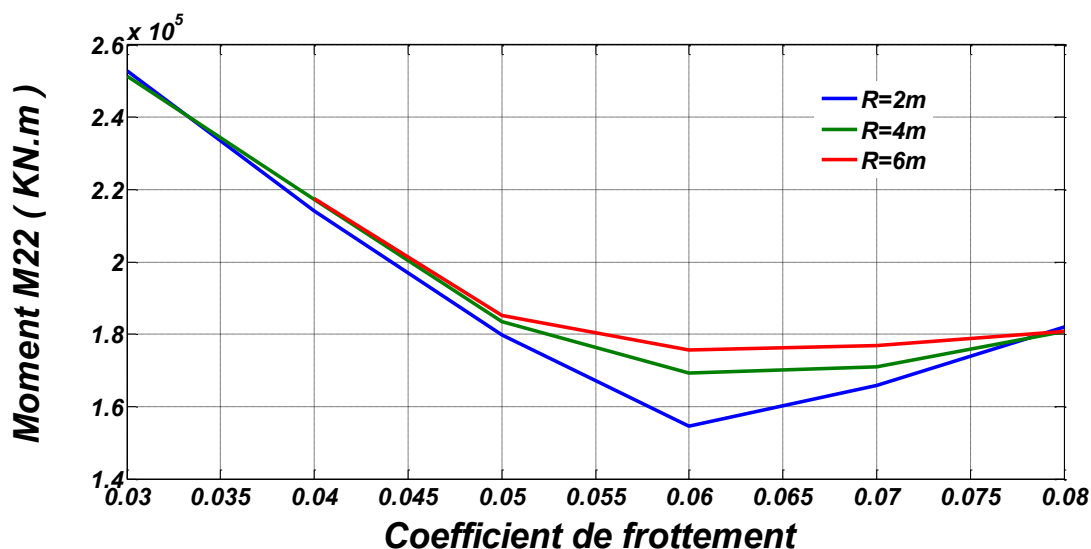


Figure IV-21 : Variation du moment  $M_{22}$  en fonction du coefficient de frottement pour différents rayons.

La figure IV-21 présente les résultats du Moment fléchissant  $M_{22\text{max}}$  en fonction des valeurs de coefficient de frottement  $\mu$  et le rayon de la surface de glissement  $R$ .

On voit une diminution initiale du moment  $M_{22\text{max}}$ , puis une augmentation avec l'augmentation du coefficient de frottement pour chaque valeur de rayon  $R$ .

- Pour  $R=2\text{m}$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution initiale, mais à partir de  $\mu=0.06$  il commence à augmenter légèrement.
- Pour  $R=4\text{m}$ , de  $\mu=0.03$  à  $0.08$ , on constate une diminution initiale, mais à partir de  $\mu=0.06$  il commence à augmenter légèrement.
- Pour  $R=6\text{m}$ , de  $\mu=0.04$  à  $0.08$ , on constate une diminution initiale, mais à partir de  $\mu=0.06$  il commence à augmenter de façon plus importante que  $R=2\text{m}$  et  $R=4\text{m}$ .

On peut observer aussi que, pour une valeur donnée du coefficient de frottement ( $\mu$ ), les valeurs de  $M_{22\text{max}}$  sont similaires jusqu'à ce qu'elles commencent d'augmenter légèrement dans la valeur  $\mu=0.05$ , puis elles reviennent presque similaires à  $\mu=0.08$ .

### IV.3.2.2 Variation de Rayon de courbure la surface de glissement

L'étude paramétrique sera établie comme suit :

$\mu=0.04$  pour  $R=1\text{m}$  ;  $1.5\text{m}$  ;  $2\text{m}$  ;  $2.5\text{m}$  ;  $3\text{m}$  ;  $3.5\text{m}$  ;  $4\text{m}$  ;  $4.5\text{m}$  ;  $5\text{m}$  ;  $5.5\text{m}$  ;  $6\text{m}$

$\mu=0.06$  pour  $R=1\text{m}$  ;  $1.5\text{m}$  ;  $2\text{m}$  ;  $2.5\text{m}$  ;  $3\text{m}$  ;  $3.5\text{m}$  ;  $4\text{m}$  ;  $4.5\text{m}$  ;  $5\text{m}$  ;  $5.5\text{m}$  ;  $6\text{m}$

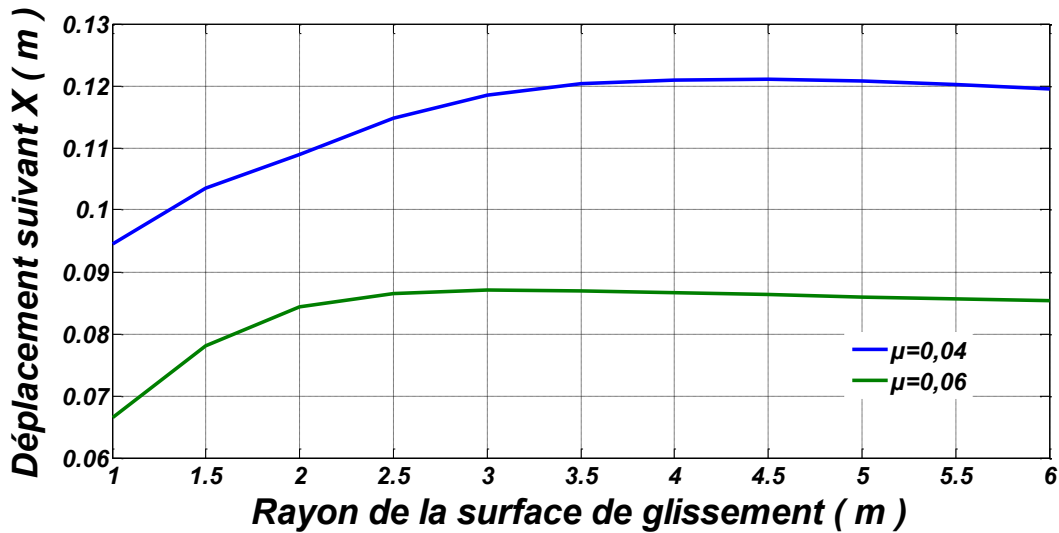


Figure IV-22: Variation du déplacement suivant X en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement.

La figure IV-22 représente la variation des déplacements suivant X ( $\Delta X$ ) en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement R avec deux coefficients de frottement différents.

Nous constatons deux phases : une première phase d'augmentation jusqu'à  $R=3$ , suivie d'une phase de stabilisation avec l'augmentation de rayon de la surface de glissement R.

- $\mu=0,04$ , de  $R=1\text{m}$  à  $6\text{m}$ , les déplacements augmentent de 16,96%.
- $\mu=0,06$ , de  $R=1\text{m}$  à  $6\text{m}$ , les déplacements augmentent de 28,42%.

On observe aussi à un rayon de courbure donné, les déplacements sont plus élevés pour un coefficient de frottement de 0,04 par rapport à 0,06.

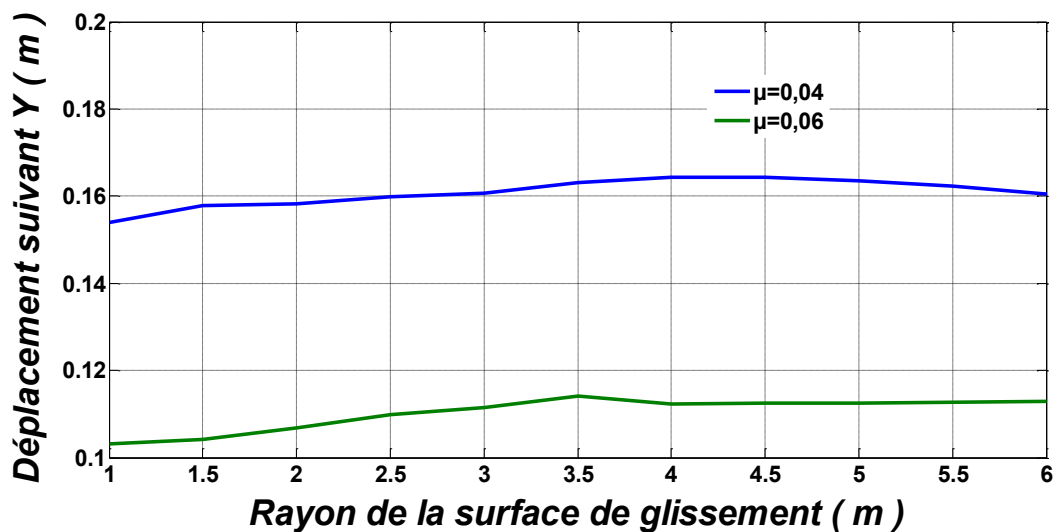


Figure IV-23: Variation du déplacement suivant Y en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement.

La figure IV-23 représente la variation des déplacements suivant Y ( $\Delta Y$ ) en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement R avec deux coefficients de frottement différents.

- Pour  $\mu=0.04$ , de R=1m à 6m, on observe que les valeurs des déplacements augmentent légèrement de 4,16 % jusqu'à atteindre une valeur de R = 4,5, puis diminuent légèrement.
- Pour  $\mu=0.06$ , de R=1m à 6m, on observe que les valeurs des déplacements augmentent de 9,65 % jusqu'à atteindre une valeur de R = 4,5, puis commencent à se stabiliser.

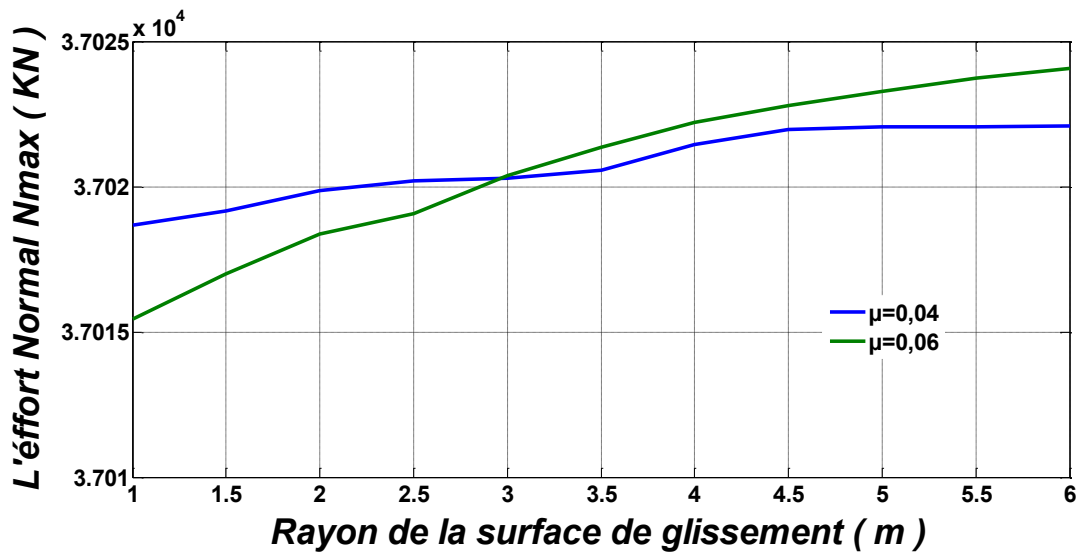


Figure IV-24: Variation de l'effort normal  $N_{max}$  en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement.

La figure IV-24 représente les valeurs de l'effort normal  $N_{max}$  en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement R avec deux coefficients de frottement différents.

On remarque une augmentation de l'effort normal  $N_{max}$  avec l'augmentation de Rayon de la surface de glissement.

- $\mu=0.04$ , de R=1m à 6m, les valeurs de l'effort normal  $N_{max}$  augmentent légèrement de 0,009%.
- $\mu=0.06$ , de R=1m à 6m, les valeurs de l'effort normal  $N_{max}$  augmentent de 0,023% de façon plus modéré que  $\mu=0.04$ .

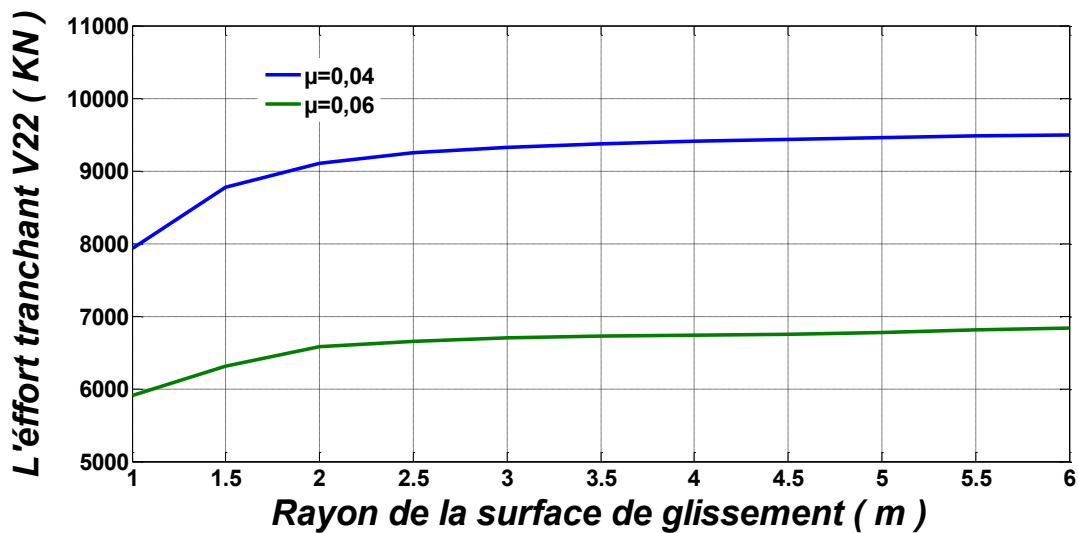


Figure IV-25 : Variation de l'effort tranchant  $V_{22}$  en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement.

La figure IV-25 représente les valeurs de L'effort tranchant  $V_{22max}$  en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement R avec deux coefficients de frottement différents.

Nous constatons deux phases : une première phase d'augmentation jusqu'à  $R=2,5$ , suivie d'une phase de stabilisation avec l'augmentation de rayon de la surface de glissement R.

- $\mu=0.04$ , de  $R=1m$  à  $6m$ ,  $V_{22max}$  augmentent de 19,67%.
- $\mu=0.06$ , de  $R=1m$  à  $6m$ ,  $V_{22max}$  augmentent de 15,68%.

On observe aussi à un rayon de courbure donné, les valeurs de l'effort tranchant sont plus élevées pour un coefficient de frottement de 0,04 par rapport à 0,06.

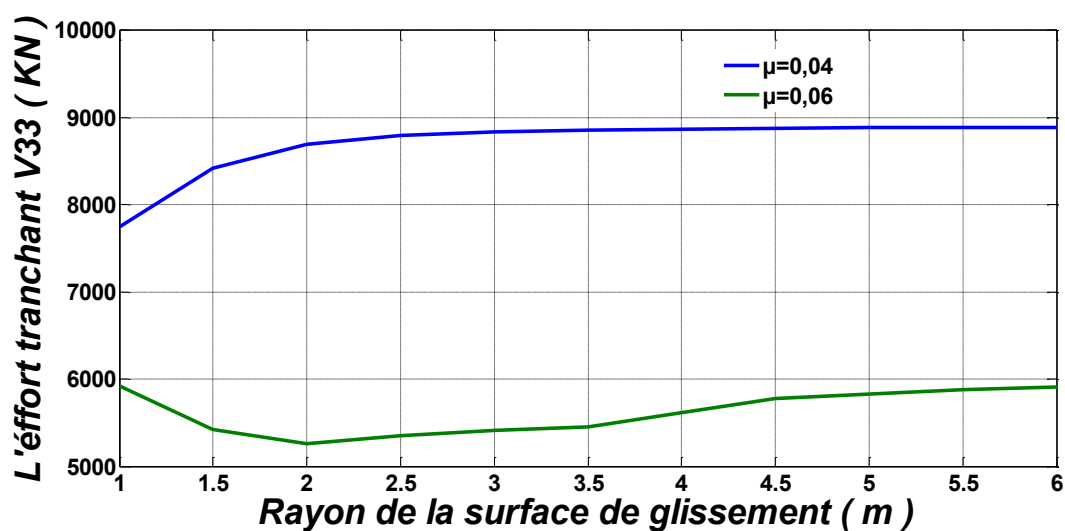
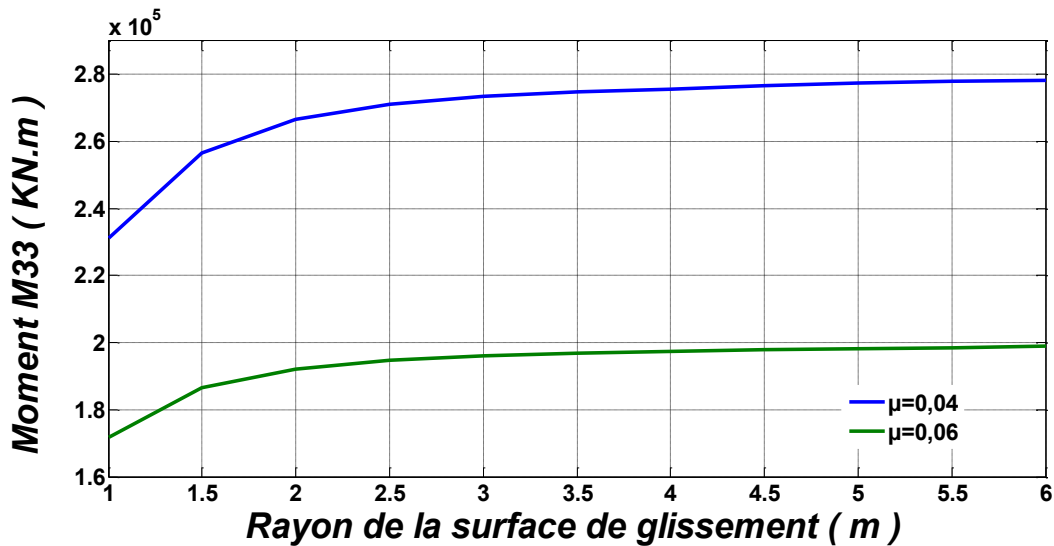


Figure IV-26: Variation de l'effort tranchant  $V_{33}$  en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement.

La figure IV-26 représente les valeurs de L'effort tranchant  $V_{33\max}$  en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement  $R$  avec deux coefficients de frottement différents.

- $\mu=0.04$ , de  $R=1\text{m}$  à  $6\text{m}$ , on observe que les valeurs de  $V_{33\max}$  augmente initialement de 14,68 %, suivie une stabilisation lorsque le rayon est augmenté.
- $\mu=0.06$ , de  $R=1\text{m}$  à  $6\text{m}$ , on observe que les valeurs de  $V_{33\max}$  diminue initialement de 0,11%, suivie une augmentation légère lorsque le rayon est augmenté.

Pour chaque valeur de rayon, on constate que l'effort tranchant diminue généralement avec l'augmentation du coefficient de frottement.



**Figure IV-27:** Variation du moment  $M_{33}$  en fonction du rayon de surface de glissement pour différent coefficient de frottement.

La figure IV-27 représente les valeurs du moment  $M_{33\max}$  en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement  $R$  avec deux coefficients de frottement différents.

On observe que le moment  $M_{33\max}$  augmente initialement, suivie une stabilisation avec l'augmentation de rayon de la surface de glissement pour les deux coefficients de frottement.

- $\mu=0.04$ , de  $R=1\text{m}$  à  $6\text{m}$ , les valeurs de  $M_{33\max}$  augmente de 20,39% lorsque le rayon est augmenté.
- $\mu=0.06$ , de  $R=1\text{m}$  à  $6\text{m}$ , les valeurs de  $M_{33\max}$  augmente de 15,89% lorsque le rayon est augmenté.

Pour chaque valeur de rayon, on constate que le moment diminue généralement avec l'augmentation du coefficient de frottement.

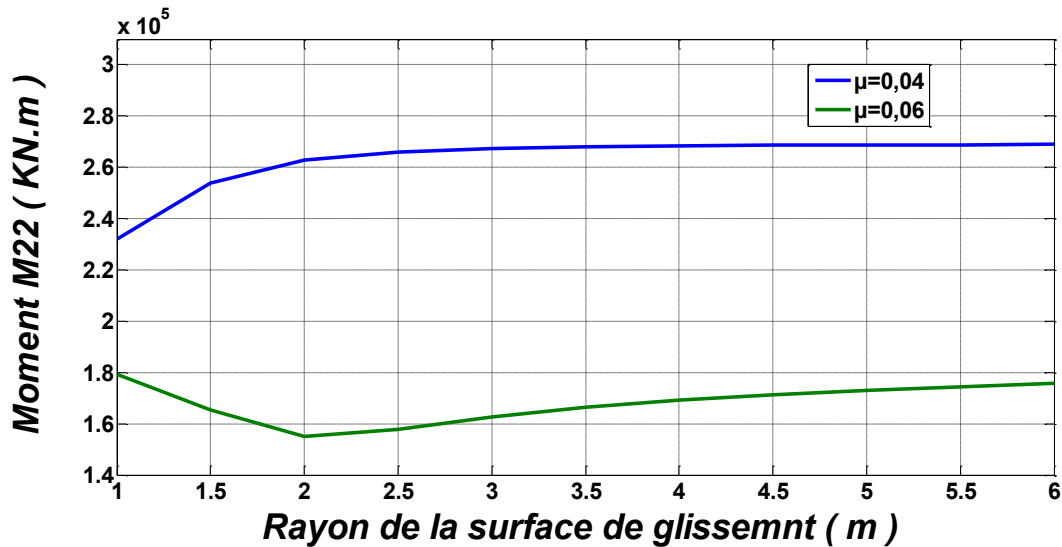


Figure IV-28 : Variation du moment  $M_{22}$  en fonction du rayon de surface de glissement pour différents coefficients de frottement.

La figure IV-28 représente les valeurs du moment  $M_{22max}$  en fonction de différentes valeurs du rayon de surface de glissement  $R$  avec deux coefficients de frottement différents.

- $\mu=0.04$ , de  $R=1m$  à  $6m$ , on observe que les valeurs de  $M_{22max}$  augmente initialement de 18,84%, suivie une stabilisation lorsque le rayon est augmenté.
- $\mu=0.06$ , de  $R=1m$  à  $6m$ , on observe que les valeurs de  $M_{22max}$  diminue initialement de 2,04%, suivie une augmentation légère lorsque le rayon est augmenté.

Pour chaque valeur de rayon, on constate que le moment diminue généralement avec l'augmentation du coefficient de frottement.

#### IV.4 Synthèse des études paramétriques

Les résultats de l'étude paramétrique sur les isolateurs à pendule à friction (FPS) du pont étudié montre plusieurs aspects importants qui peuvent guider la conception et l'optimisation de ces systèmes.

Voici Les principales conclusions tirées de l'analyse des variations du coefficient de frottement ( $\mu$ ) et du rayon de la surface de glissement ( $R$ ) :

##### IV.4.1 Effet du coefficient de frottement ( $\mu$ ) sur les déplacements et les charges maximales

Une augmentation du coefficient de frottement entraîne généralement une diminution des déplacements horizontaux  $\Delta X$  et  $\Delta Y$ , ce qui indique une meilleure capacité du système à revenir à sa position initiale après avoir été déplacé.

Les efforts axiaux maximaux supportées par le système  $N_{max}$  augmentent généralement avec l'augmentation du coefficient de frottement, ce qui suggère une meilleure capacité de charge sous des frottements plus importants.

#### **IV.4.2 Effet du rayon de la surface de glissement (R) sur les déplacements et les charges maximales**

Une augmentation du rayon de la surface de glissement entraîne généralement une augmentation des déplacements, bien que cette augmentation soit plus faible pour des coefficients de frottement plus élevés.

Les efforts axiaux maximaux  $N_{\max}$  présentent une légère variation avec le rayon de la surface de glissement, avec une tendance à augmenter légèrement avec l'augmentation de R, bien que cette variation soit moins significative que l'effet du coefficient de frottement.

#### **IV.4.3 Effet combiné du coefficient de frottement et du rayon de la surface de glissement**

Les résultats indiquent une interaction complexe entre le coefficient de frottement et le rayon de la surface de glissement, avec des effets variables selon les paramètres considérés.

Pour les déplacements horizontaux  $\Delta X$ , l'effet du coefficient de frottement est plus prédominant que celui du rayon de la surface de glissement.

Pour les efforts axiaux maximaux  $N_{\max}$ , l'impact du coefficient de frottement est plus important que le rayon de la surface de glissement.

#### **IV.4.4 Effet sur les efforts tranchants et les moments**

Les résultats montrent une diminution des efforts tranchants  $V_{22,\max}$  et  $V_{33,\max}$  et des moments fléchissant  $M_{22,\max}$  et  $M_{33,\max}$  avec l'augmentation du coefficient de frottement, indiquant une meilleure distribution des charges et une réduction des contraintes sur la structure.

Cette diminution des contraintes est observée pour différentes valeurs de rayon de la surface de glissement, bien que cette diminution puisse varier en fonction du rayon.

Globalement, les résultats de l'étude suggèrent que l'optimisation des isolateurs à pendule à friction devrait se concentrer sur l'augmentation du coefficient de frottement tout en tenant compte la variation du rayon de la surface de glissement. Une augmentation du coefficient de frottement peut conduire à des performances améliorées en termes de réduction des déplacements et des contraintes, ce qui pourrait se traduire par une meilleure résistance aux charges sismiques et une plus grande stabilité structurelle.

#### **IV.4.5 Les valeurs optimales**

Pour optimiser la conception du pont en termes de réponse sismique, il est recommandé de choisir un coefficient de frottement plus élevé, approximativement 0.06, et de limiter le rayon de courbure de la surface de glissement à une valeur plus faible entre 2m et 4m.

Ces paramètres équilibrent efficacement la réduction des déplacements et des efforts internes tout en maintenant la stabilité structurelle du pont.

À partir de notre étude paramétrique, nous avons déterminé les valeurs optimales pour notre ouvrage : un rayon  $R=3\text{m}$  et un coefficient de frottement  $\mu=0,06$ . Ces choix assurent une meilleure stabilité et un déplacement minimal.

On peut le constater sur la figure IV.29 qui présente le déplacement horizontal longitudinal  $\Delta x$  en comparant celui d'un pont classique avec des appareils d'appui en néoprène fretté, celui du chapitre III avec des appareils d'appui FPS1 ( $R=3.5m$  ;  $\mu=0.04$ ) et celui défini comme optimal dans ce chapitre FPS2 ( $R=3m$  ;  $\mu=0.06$ ). La réduction du déplacement est très significative.

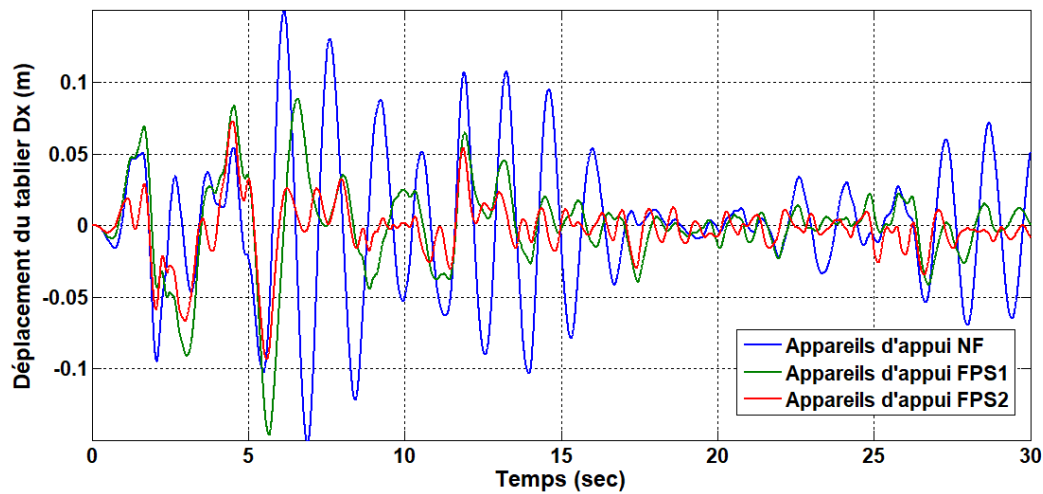


Figure IV-29 : Variation temporelle du déplacement  $\Delta x$  suivant le séisme  $S_x$ .

## IV.5 Conclusion

L'impact du coefficient de frottement est déterminant par rapport aux rayons de surface de glissement pour les FPS. Ces isolateurs s'avèrent non seulement efficaces pour l'isolation sismique et la dissipation d'énergie par la diminution de frottement, mais également pour réduire les efforts tranchants et les moments fléchissant, ce qui favorise une distribution équilibrée des charges et diminue les contraintes sur la structure. Par ailleurs, une augmentation du coefficient de frottement tend généralement à diminuer les déplacements horizontaux et à augmenter les charges maximales supportables, renforçant ainsi la résistance aux mouvements sismiques. De même, l'augmentation du rayon de courbure de la surface de glissement entraîne généralement des déplacements plus importants, même si cette tendance est moins marquée avec des coefficients de frottement plus élevés.

En conclusion, pour optimiser la conception de l'appareil d'appui du pont en termes de réponse sismique, il est recommandé de privilégier un coefficient de frottement plus élevé, d'environ 0,06, tout en limitant le rayon de la surface de glissement à une valeur modérée, comprise entre 2m et 4m. Cette approche permet un équilibre optimal entre la réduction des déplacements, la capacité de charge et la stabilité structurelle, garantissant une meilleure performance du système face aux séismes.

## *Conclusion Générale*

Ce mémoire a examiné le comportement dynamique des ponts équipés de dispositifs d'appui à pendule à friction (FPS), menant une étude détaillée de leurs comportements qui met en lumière les distinctions entre ces isolateurs et les appareils d'appui en néoprène fretté à travers une modélisation en éléments finis accompagnée d'analyses et études paramétriques.

L'analyse par modélisation en éléments finis a dévoilé que l'installation des FPS prolonge les périodes propres du pont, réduisant ainsi les déplacements dans les directions X et Y. De plus, les contraintes mécaniques telles que les efforts tranchants et les moments fléchissant ont été notablement atténuées avec l'utilisation des FPS. Ces isolateurs agissent également comme des dissipateurs d'énergie, permettant d'absorber l'énergie interne de la structure lors d'un séisme.

Les FPS se sont avérés des dispositifs très efficaces pour l'isolation sismique. Une augmentation du coefficient de frottement a tendance à réduire les déplacements horizontaux et à accroître les charges maximales supportables, renforçant ainsi la résistance aux mouvements sismiques. Également la réduction du rayon de courbure de la surface de glissement entraîne généralement des déplacements moins importants, bien que cette tendance soit accélérée avec des coefficients de frottement plus élevés. Pour optimiser leurs conceptions, il est recommandé de privilégier un coefficient de frottement plus élevé tout en limitant le rayon de la surface de glissement.

Il est important de signaler que la conception des appareils d'appuis dépend des caractéristiques géométriques, physiques et mécaniques de l'ouvrage d'art à isoler et des caractéristiques dynamiques du séisme éventuel à considérer. Pour cela, leur dimensionnement nécessitera toujours une étude paramétrique reposant sur des analyses temporelles comme le suggèrent l'Eurocode 8 et aussi le RPOA. Des études complémentaires plus affinées sur ces dispositifs sont nécessaires pour développer une méthode de calcul simplifiée pour leur dimensionnement comme outil de travail de l'ingénieur concepteur.

# Annexes

## Annexes 1 : Programme MATLAB

```
% Appareils d'appuis FPS
%
clear all;
wd=4427;      % Poids sismique du pont correspondant à l'appareils d'appui [kN] / G+0,3.Q
rb=6.0;      % Rayon de la surface de glissement [m]
dy=0.008;    % Déplacement effectif [m]
nisol=1;     % Nombre d'isolateurs
mudmin=0.032; % Coefficient de frottement dynamique minimal
mudmax=0.081; % Coefficient de frottement dynamique maximal

mu=0.03;     % Coefficient de frottement dynamique de calcul

s=1.30;     % Coefficient de site
t1=0.20;    % Période caractéristique de site EC8 RPOA
t2=0.50;
t3=3.00;
ag=0.25;    % Coefficient d'accélération de zone

dcd1=0; dcd2=0.116;
while abs(dcd2-dcd1)>1e-9

    clc;
    dcd1=dcd2;

    disp(['Poids appliqué à Appareil Appui Wd = ' num2str(wd) ' kN']);

    clc;
    dcd1=dcd2;

    disp(['Poids appliqué à Appareil Appui Wd = ' num2str(wd) ' kN']);
    disp(['Rayon de courbure Appareil Appui Rb = ' num2str(rb) ' m']);
    disp(['Coefficient de frottement dynamique = ' num2str(mu)]);
    disp(['Coefficient de frottement dynamique (slow) = ' num2str(mudmin)]);
    disp(['Coefficient de frottement dynamique (fast) = ' num2str(mudmax)]);

    pt=(1/0.2)*log((mudmax-mudmin)/(mudmax-0.8*mudmax));
    disp(['Paramètre de taux = ' num2str(pt)]);
    disp(['Déplacement de conception calculée = ' num2str(dcd1) ' m']);
    f=wd*(mu+(dcd1/rb));
    keff=f/dcd1;
    teff=2*pi*((wd/9.81)/keff)^0.5;
    ed=(4*wd*mu*(dcd1-dy));
    psieff=ed/(2*pi*keff*dcd1^2);
    etaeff=(0.10/(0.05+psieff))^0.5;
    dc=(0.625/pi^2)*ag*9.81*s*etaeff*t2^2;
    disp(['Force de frottement F = ' num2str(f) ' kN']);
    disp(['Rigidité effective Keff = ' num2str(keff) ' kN/m']);
    disp(['Période Teff = ' num2str(teff) ' sec']);
    disp(['Energie Ed = ' num2str(ed) ' kN.m']);
    disp(['Taux Amortissement = ' num2str(psieff)]);
    disp(['Facteur de correction Amortissement = ' num2str(etaeff)]);
    disp(['Déplacement spectral = ' num2str(dc) ' m']);

    if ((t1<=teff) && (teff<=t2))
        dcd2=(teff/t2)*dc;
        se=2.5*ag*s*etaeff;
        disp(['Accélération spectrale = ' num2str(se) ' .g']);
    else
        disp(['Déplacement de conception calculée = ' num2str(dcd2) ' m']);
        if ((t2<=teff) && (teff<=t3))
            dcd2=(teff/t2)*dc;
            se=2.5*(t2/teff)*ag*s*etaeff;
            disp(['Accélération spectrale = ' num2str(se) ' .g']);
            disp(['Déplacement de conception calculée = ' num2str(dcd2) ' m']);
        else
            dcd2=(t2/t2)*dc;
            se=2.5*(t2*t3/teff^2)*ag*s*etaeff;
            disp(['Accélération spectrale = ' num2str(se) ' .g']);
            disp(['Déplacement de conception calculée = ' num2str(dcd2) ' m']);
        end;
    end;
    vd=(wd/9.81)*se*9.81;
    vd=keff*dcd2;
    disp(['Force sismique globale = ' num2str(vd) ' kN']);
    disp(['Force de cisaillement globale = ' num2str(vd) ' kN']);
    disp(['Nombre des isolateurs = ' num2str(nisol)]);
    vdisol=vd/nisol;
    keffl=keff/nisol;
    k1=(wd/nisol)*mu/dy;
    knl=(vdisol-((wd/nisol)*mu))/(dcd2-dy);
    rap=knl/k1;
    vy=mu*wd/nisol;
    disp(['Force de cisaillement / isolateur = ' num2str(vdisol) ' kN']);
    disp(['Rigidité effective Keff / isolateur = ' num2str(keffl) ' kN/m']);
    disp(['Rigidité linéaire K1 / isolateur = ' num2str(k1) ' kN/m']);
    disp(['Rigidité non linéaire Knl / isolateur = ' num2str(knl) ' kN/m']);
    disp(['Taux Diminution Rigidité = ' num2str(rap)]);
    disp(['Courbe : '(0,0) '( ' num2str(dy) ', ' num2str(vy) ')...
    '( ' num2str(dcd1) ', ' num2str(vdisol) ')']);
end;
```

## Annexes 2 : Exécution MATLAB

Command Window

```
Poids appliqué à Appareil Appui Wd = 4427 kN
Rayon de courbure Appareil Appui Rb = 3.5 m
Coefficient de frottement dynamique = 0.04
Coefficient de frottement dynamique (slow) = 0.032
Coefficient de frottement dynamique (fast) = 0.081
Paramètre de taux = 5.534
Déplacement de conception calculée = 0.20135 m
Force de frottement F = 431.7605 kN
Rigidité effective Keff = 2144.3157 kN/m
Période Teff = 2.8824 sec
Energie Ed = 136.9545 kN.m
Taux Amortissement = 0.25073
Facteur de correction Amortissement = 0.57665
Déplacement spectral = 0.034928 m
Accélération spectrale = 0.097529 .g
Déplacement de conception calculée = 0.20135 m
Force sismique globale = 431.7605 kN
Force de cisaillement globale = 431.7605 kN
Nombre des isolateurs = 1
Force de cisaillement / isolateur = 431.7605 kN
Rigidité effective Keff / isolateur = 2144.3157 kN/m
Rigidité linéaire Kl / isolateur = 22135 kN/m
Rigidité non linéaire Knl / isolateur = 1317.1912 kN/m
Taux Diminution Rigidité = 0.059507
Courbe : (0,0) (0.008,177.08) (0.20135,431.7605)
```

$f_x$  >>

# Annexes 3 : Catalogue commercial d'un système FPS



Infrastructure | Bâtiment | Structures Industrielles

## dispositifs de protection parasismique mageba – pour la préservation des structures



### RESTON®PENDULUM Surface glissante courbe sûr, innovant, adaptable



mageba



## Propriétés et avantages

### Matériaux

Les matériaux suivants sont utilisés par mageba pour la production des appareils RESTON®PENDULUM :

- Acier de qualité S355
- Matériau glissant certifié ROBO®SLIDE avec de sans abrasifs de lubrification, conformément à l'agrément Technique Européen ETA-08/0115
- Grasse de silicone certifiée utilisée comme lubrifiant
- Surfaces de contact des plaques d'appui avec un chromage dur ou en acier inoxydable austénitique poli (grade 1.4401)

### Dimensions principales

Le tableau ci-dessous donne les dimensions principales des appareils RESTON®PENDULUM Mono et Duplo en fonction de la charge verticale et du déplacement maximal (valeur de dimensionnement).

### Protection contre la corrosion

mageba propose des systèmes standards de protection contre la corrosion conforme à l'EN ISO 12944. La catégorie de protection dépend de l'emplacement, des conditions environnementales et du degré de protection requis.

Des systèmes de protection contre la corrosion fournis à d'autres normes peuvent être fournis sur demande.



1 Traitement de surface d'un RESTON®PENDULUM

### Avantages

- Réduction des sollicitations dynamiques sur les éléments structuraux, permettant de concevoir des structures élastiques et économiques
- Augmentation de la sécurité parasismique de la structure et de ses usagers
- Haute capacité à supporter des charges avec une géométrie compacte
- Capacité de recentrage permettant à la structure de retrouver sa position initiale après des déplacements excessifs
- Simplicité de conception et adaptabilité à tout type de structure
- Applicable aussi bien à de nouvelles structures qu'à des structures existantes devant être réhabilitées
- Durée de vie plus longue des appareils grâce à leurs composants de très haute qualité
- Quasiment sans entretien grâce à la grande durabilité de la protection anti-rouille et à la haute performance du matériau glissant
- Technologie de protection parasismique bien établie au fil des années pour des structures dans le monde entier

PENDULUM PM (Mono)				PENDULUM PD (Duplo)						
Type	Charge verticale $N_v$ [kN]	Diamètre de la plaque glissante (mm)			Type	Charge verticale $N_v$ [kN]	Diamètre de la plaque glissante (mm)			
		Ø161	Ø200	Ø250			Ø161	Ø200	Ø250	
PM-3	2,000	460	460	460	PD-3	2,000	317	455	593	731
PM-4	3,000	505	705	905	PD-4	3,000	348	486	624	762
PM-4	4,000	550	750	950	PD-4	4,000	379	517	655	793
PM-5	5,000	590	790	990	PD-5	5,000	407	545	683	821
PM-6	6,000	635	835	1,035	PD-6	6,000	438	576	714	852
PM-7	7,000	690	890	1,090	PD-7	7,000	476	614	752	890
PM-8	8,000	735	935	1,135	PD-8	8,000	507	645	783	921
PM-9	9,000	780	980	1,180	PD-9	9,000	538	676	814	952
PM-10	10,000	825	1,025	1,225	PD-10	10,000	569	707	845	983
PM-11	11,000	860	1,060	1,260	PD-11	11,000	593	731	869	1,007
PM-12	12,000	900	1,100	1,300	PD-12	12,000	623	759	897	1,034
PM-15	15,000	990	1,190	1,390	PD-15	15,000	683	821	959	1,097
PM-20	20,000	1,125	1,325	1,525	PD-20	20,000	776	914	1,052	1,190
PM-25	25,000	1,250	1,450	1,650	PD-25	25,000	862	1,000	1,138	1,276
PM-30	30,000	1,340	1,540	1,740	PD-30	30,000	924	1,062	1,200	1,338
PM-35	35,000	1,500	1,700	1,900	PD-35	35,000	1,024	1,172	1,310	1,448
PM-40	40,000	1,650	1,850	2,050	PD-40	40,000	1,138	1,276	1,414	1,552
PM-45	45,000	1,760	1,960	2,160	PD-45	45,000	1,214	1,352	1,490	1,628

Ø161: déplacement maximal (valeur de dimensionnement). Les valeurs présentées dans le tableau ci-dessus sont basées sur un rayon de courbure de 3,0m pour les isolateurs Mono, et 7,0m pour les isolateurs Duplo.

Note importante: ces tableaux sont destinés au dimensionnement préliminaire des isolateurs. La dimensionnement final et les détails techniques sont définis complètement que lorsque tous les paramètres du projet, tels que le période naturelle et les conditions sismiques, sont considérés dans le dimensionnement final.

mageba



## Caractéristiques et types

### Principe

Les appuis glissants à surface courbe RESTON®PENDULUM produits par mageba se basent sur le principe de fonctionnement du pendule. Ils permettent les déplacements horizontaux de la structure et le décalage de la période naturelle de la structure. Une fois activés par un tremblement de terre, les isolateurs permettent de découpler la structure des mouvements du sol. Après le tremblement de terre, l'appui revient dans sa position initiale grâce aux forces gravitationnelles.

### Propriétés

Les appuis glissants à surface courbe remplissent les fonctions principales suivantes :

- Sous les conditions de service, les appareils sont conçus pour transmettre des charges verticales et permettre des déplacements horizontaux.
- En cas de tremblement de terre, la flexibilité latérale est atteinte grâce au glissement d'un élément le long de la surface courbe primaire.
- La dissipation d'énergie sismique est ainsi assurée par friction dynamique entre la surface glissante en acier inoxydable et le ROBO®SLIDE, matériau glissant de haute performance.
- La fonction de recentrage est assurée grâce à la combinaison de la gravité et de la géométrie de l'appareil.

### Isolation sismique

L'isolation sismique consiste à découpler la structure des mouvements du sol induits par un tremblement de terre, afin d'empêcher des dommages à la structure. Pour réaliser un tel découplage, différents appareils parasismiques – connus sous le nom d'isolateurs – sont installés de manière stratégique à divers emplacements de la structure, leur permettant ainsi de empêcher leur tâtée correctement lors d'un tremblement de terre. Les isolateurs sismiques RESTON®PENDULUM fournissent une flexibilité suffisante à la structure, afin que la période naturelle de la structure diffère le plus possible de la période naturelle du tremblement de terre. Cela empêche la structure d'entrer en résonance, ce qui pourrait mener à des dommages considérables de la structure.

### Types

**RESTON®PENDULUM Mono (PM)**  
Les appuis RESTON®PENDULUM Mono sont composés de trois éléments de base : une surface glissante courbe primaire, donc le rayon de courbure détermine la période d'oscillation de l'appareil, un élément en acier équipé de ROBO®SLIDE, glissant le long de la surface courbe primaire et une plaque d'acier conçue spécialement pour accueillir les rotations de l'appareil.

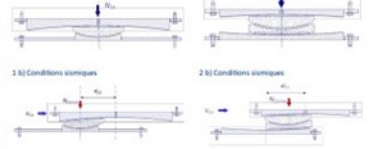
**RESTON®PENDULUM Duplo (PD)**  
Les appuis RESTON®PENDULUM Duplo sont composés de deux surfaces glissantes primaires. Cela permet de faciliter de plus grands déplacements horizontaux tout en gardant de plus petites dimensions. Le type Duplo est composé d'un élément balancier et d'un élément d'articulation permettant à l'appui d'accueillir des rotations. Cette particularité est essentielle, particulièrement pour les ponts nécessitant une haute capacité de déplacement et de rotation.

Les dessins ci-dessous présentent une comparaison des tailles des RESTON®PENDULUM Mono et Duplo. Les exigences dynamiques pour les deux types sont identiques.



1 a) Conditions de service

2 a) Conditions de service



1 b) Conditions sismiques

2 b) Conditions sismiques

- Élément balancier articulé d'un appareil RESTON®PENDULUM Mono (PM) procurant une haute capacité de rotation
- RESTON®PENDULUM (Duplo) PD

2

mageba



## Qualité et services

### Qualité

Durant les cinquante dernières années, les appuis mageba ont prouvé leur valeur dans des milliers de structures et dans les conditions les plus sévères. La qualité et la durabilité des appuis produits par mageba sont assurées non seulement par leurs propriétés bien établies, mais aussi par l'expérience de notre personnel qualifié.

mageba dispose d'un système de qualité orienté processus certifié selon l'ISO 9001:2008. Les usines mageba sont approuvées pour le soudage selon l'ISO 3834-2, et certifiées conformément à la norme de construction en acier EN 1090.

### Conformité CE

Les appuis RESTON®PENDULUM conçus et produits conformément à l'EN 15129:2009 et à l'EN 1337 et sont marqués du label CE. Cela indique qu'ils remplissent toutes les conditions spécifiées dans la norme, sans exception. Tous les tests réalisés sur les appareils RESTON®PENDULUM ont été réalisés par un institut indépendant, supervisé par un organisme certifié.

### Essais

Si le client le désire, mageba offre des essais de contrôle à grande échelle. Les essais sont réalisés avec des instituts d'essais tiers. Les tests généralement réalisés sont basés sur la norme européenne EN 15129:2009.

### Combinaison

Si les spécifications du projet le nécessitent, les appuis glissants RESTON®PENDULUM à surface courbe peuvent être combinés avec d'autres appareils parasismiques de mageba, tels que les amortisseurs RESTON®SA, les amortisseurs bloquants RESTON®STU et les amortisseurs à ressorts précontraints.

mageba fournit les conseils nécessaires afin de trouver la solution la plus efficace et la plus adaptée pour l'isolation et l'atténuation sismiques.

### Installation

mageba offre une supervision d'installation pour tous les produits dans le monde entier. Cette supervision est hautement recommandée pour assurer une installation correcte des appareils et pour profiter de la garantie complète mageba. Il est essentiel de manipuler les appareils avec précaution durant le transport et l'installation, pour éviter tout dommage.

### Inspection et maintenance

Grâce à l'utilisation de composants de haute qualité, l'application de méthodes de conception avancées et un système d'assurance de qualité interne systématique, les appareils parasismiques mageba ne nécessitent pas d'entretien.

Cependant, mageba recommande de mener une inspection visuelle tous les 3-5 ans.

Un manuel d'installation ainsi qu'un manuel d'inspection sont livrés par mageba, en même temps que les appareils d'appui, permettant au personnel opérationnel et de maintenance de mener des inspections régulières et appropriées.

### Services

Nos spécialistes sont toujours disponibles pour vous conseiller dans le choix de la solution optimale pour votre projet et pour vous fournir des offres.

Vous trouverez plus d'informations sur le produit, notamment des listes de références et des documents d'appel d'offre sur notre site [mageba-group.com](http://mageba-group.com).

### Projets de référence incluant des appareils de protection parasismique mageba



Aneza Bridge (TM) Stavros Niarchos (GR) Lengenbogen (DE) Ramstein Bridge (XZ) Ajari Bridge (TH) Vuou da Gamu Bridge (PT)

### Systèmes de protection parasismique de mageba



mageba  
engineering connections®

2024 03 CH-FR Envoigeba

info@mageba-group.com - mageba-group.com

## Références Bibliographiques

- [1]. Casarotti, C. *Bridge isolation and dissipation devices: State of the art review of seismic response and modelling of modern seismic isolation and dissipation devices*. Pavia : University of Pavia and ROSE School, 2004.
- [2]. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*. Washington D.C. : Highway Subcommittee on Bridge and Structures, 2009.
- [3]. Eurocode 8 - *Design of Structures for Earthquake Resistance (Part 2: Bridges)*. Brussels : European Committee for Standardization, 2005.
- [4]. Gilberto Mosqueda, Andrew S. Whittaker, Gregory L. Fenves et Stephen A. Mahin. *Exécutante Earthquake Engineering Research*. California : Center University of California, Berkeley 1301 South, Mars 2004.
- [5]. Saïdou, A. *Étude du comportement en compression-cisaillement d'isolateurs sismiques en caoutchouc*. s.l. : Université de Sherbrooke, 2012.
- [6]. Paultre, P. *Dynamique des structures : Application aux ouvrages de génie civil*. s.l. : Hermes Science, 2005.
- [7]. A. Charleson, A. Guisasola. *Isolation sismique pour les architectes*. s.l. : illustrée, 2017. 194.
- [8]. *Assessment of Temperature Effects on Seismic Response of Base-Isolated Bridges in Eastern and Western Canada*. Victoria, British Columbia : École de technologie supérieure, Canada, 2015.
- [9]. *L'Office fédéral des routes. Evaluation parasismique des ponts-routes existants*. Berne, Suisse. : Office fédéral des routes OFROU, 2005.
- [10]. GILLICH, Camellia Stefania JURCAU & Gilbert-Rainer. *The use of Friction Pendulum Bearings for isolation of the built environment*. s.l. : Université «Eftimie Murgu» de Resita.
- [11]. KELLY, J. *The Role of Damping in Seismic Isolation*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 1996.
- [12]. Zayas, VA, SS Low et SA Mahin. *Isolation sismique utilisant le système de pendule à friction*. Institut de recherche en génie parasismique. : s.n., 1987.
- [13]. Guizani, L. *Isolation sismique et technologies parasismiques pour les ponts au Québec : Mise au point*. Québec, Canada : ALG Groupe Conseil Inc., 2003. 10<sup>ème</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art.
- [14]. Y, Takahashi. *Damage of rubber bearings and dampers of bridges*. Kyoto, Japon : s.n., 2011. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto.
- [15]. *Seismic Isolation for Earthquake-Resistant Structures*. Lui, Eric M. 9, Syracuse, New York : Département de Génie Civil et Environnemental, Université de Syracuse, 2001, *Journal d'ingénierie des structures*, Vol. 117.
- [16]. O. Gauron, A. Saidou, A. Busson et P. Paultre. *Détermination des états limites des appuis et des isolateurs de ponts dans une approche basée sur la performance sismique*.

*Sherbrooke, Canada, : Centre de recherche en génie parasismique et en dynamique des structures, 2014. Rapport de Recherche.*

[17]. MJ Nigel Priestley, Frieder Seible et Gian Michele C. *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. [éd.] 1996 John Wiley & Sons. illustrée. 1996. Vol. 704.

[18]. Constantinou, M., Whittaker, A., Fenz, D., & Apostolakis, G. *Seismic Isolation of Bridges*. University at Buffalo, State University of New York : Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, 2007. Report Submitted to the State of California Department of Transportation .

[19]. *teflon Bearings in Base Isolation II: Modeling*. Constantinou, M., Mokha, A., & Reinhorn, A. 2, s.l. : Journal of Structural Engineering-asce, 1990, Journal of Structural Engineering, Vol. 116.

[20]. Gilberto Mosqueda, Andrew S. Whittaker, Gregory L. Fenves et Stephen A. Mahin 9. *Etudes expérimentales et analytiques du système de pendule à friction pour la protection sismique de ponts simples*. California : Département d'ingénierie de californie, Mars 2004. Thèse doctorat . Département d'ingénierie de californie.

[21]. Constantinou, M. C., Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M., & Warn, G. P. *Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading*. Red Jacket Quadrangle, Buffalo, NY 14261 : University at Buffalo, The State University of New York, 2007. Technical Report MCEER-07-0012.

[22]. L. Guizani, ing., M.Sc.A. *Sur l'isolation sismique des ponts au Canada*. , Québec : Les Industries Z-Tech Inc, 2003. 10e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art (In french).

[23]. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*. Washington D.C. : Highway Subcommittee on Bridge and Structures, 2010.