

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil



Mémoire pour l'obtention du diplôme de

Magister en Génie Civil

Option : Seismic Risk & Earthquake Engineering

INTITULE :

***COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES STRUCTURES INTELLIGENTES : POTEAUX-
POUTRE EN TENANT COMPTE DE L'EFFET DE L'INTERACTION
SOL-STRUCTURE***

Présenté et soutenu le : 23/12/ 2013 par :

RETERI Khadidja

Devant le jury composé de :

Dr. D. ZENDAGUI	Président	UABB. Tlemcen
Pr. N. BOUMECHRA	Examineur	UABB. Tlemcen
Dr. K. HAMDAOUI	Examineur	UABB. Tlemcen
Pr. A. MEGNOUNIF	Encadreur	UABB. Tlemcen

Remerciement

Je voudrais en premier lieu remercier particulièrement mon encadreur Pr A. MEGNOUNIF pour m'avoir proposé un sujet intéressant et pour la confiance qu'il m'a accordée. Il m'a dirigé tout au long de cette étude et m'a donné les grands axes de recherche.

J'adresse mes remerciements les plus respectueux, plus particulièrement à Dr D.ZENDAGUI pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de la présente travaille.

Je remercie également le Professeur N. BOUMECHRA et le docteur K. HAMDAOUI, d'avoir accepté de juger ce travail et les remercie de leurs critiques et pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu manifester à l'égard de cette mémoire.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements ainsi que ma grande gratitude reconnaissance envers tous mes enseignants, et tous mes collègues et mes amis dans le laboratoire RISAM.

Je remercie enfin toute ma famille, mes proches et particulièrement mes parents pour son réconfort et son appui chaleureux tout au long de ces longues années.

RESUME

Dans Cette étude, on s'intéresse à deux domaines différents et très importants dans la construction en génie civil, le domaine des structures intelligentes et le domaine d'interaction sol structure.

Dans une première partie, on a présenté une analyse bibliographique détaillée sur les structures intelligentes ainsi que les différents types de contrôle. Cette partie a été suivie par un exposé détaillé de phénomène d'interaction sol-structure et de ces différentes méthodes de calcul.

Pour cela, un programme a été élaboré sous MATLAB permettant l'analyse de structures intelligentes de type poteau-poutre en tenant compte de l'interaction sol-structure.

L'étude numérique menée, par la suite, nous a permis de comprendre l'effet de l'ISS ainsi que le rôle et l'importance du contrôle structurel.

Mot clés : Contrôle, Intelligente, Interaction, Sol-structure.

ABSTRACT

In this study, we look at two very different and important domain in construction of civil engineering, the domain of smart structures and soil structure interaction domain.

In the first part, we presented a detailed literature review on intelligent as well as different types of control structures. This section was followed by a detailed phenomenon of soil-structure interaction and the different methods of calculation described.

For this, a program was developed in MATLAB for analysis of smart structures post-type beam taking into account the soil-structure interaction.

The numerical study subsequently allowed us to understand the effect of the ISS and the role and importance of structural control.

Key words : control, smart, interaction, soil-structure.

ملخص

في هذه الدراسة، تطرقنا إلى مجالين مختلفين في الهندسة المدنية، مجال الهياكل الذكية والتفاعل بين التربة و الهيكل في الجزء الأول، قدمنا مراجعة مفصلة عن الهياكل الذكية، فضلا عن أنواع مختلفة من هياكل المراقبة. و أعقبنا هذا القسم بشرح مفصل عن ظاهرة التفاعل بين التربة و الهيكل وأساليب مختلفة لحسابها و وصفها لهذا، تم تطوير برنامج في ماتلاب لتحليل الهياكل الذكية مع مراعاة التفاعل بين التربة و الهيكل. سمحت هذه الدراسة العديدة في وقت لاحق لنا أن نفهم تأثير التفاعل بين التربة و الهيكل ودور وأهمية الرقابة الهيكلية.

الكلمات الدالة : التحكم الذكي، التفاعل، التربة و البنية

TABLE DES MATIERES

RESUME

ABSTRACT

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES UTILISES

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 01 : Structures intelligentes

1.1	Introduction.....	4
1.2	La technologie des systèmes intelligents	4
1.3	Définition d'une structure intelligente	5
1.4	Le rôle des composants fondamentaux d'une structure intelligente	7
1.4.1	Les capteurs.....	7
1.4.2	Transmission des données.....	8
1.4.3	Unité de commande et de contrôle.....	8
1.4.4	Instruction	9
1.4.5	Les actionneurs	9
1.5	Matériaux intelligents	9
1.6	Conclusion	10

CHAPITRE 02 : Contrôle des structures

2.1	Introduction.....	14
2.2	Contrôle passif	14
2.2.1	Systèmes d'isolation sismique	15
2.2.2	Système de dissipation d'énergie passif.....	18
2.2.3	Système d'absorption d'énergie.....	19
2.3	Contrôle actif.....	23
2.4	Contrôle semi actif.....	26
2.5	Contrôle hybride	28
2.6	Conclusion	30

CHAPITRE 03 : L'effet de l'interaction sol-structure

3.1	Introduction.....	32
3.2	Etat de l'art de l'ISS.....	32
3.3	Phénomène d'interaction sol structure.....	33
3.4	Les différentes méthodes pour prendre en compte l'ISS	33
3.4.1	La méthode globale (<i>Méthode Directe</i>)	33
3.4.2	Méthode de sous structure.....	38
3.5	Equation de mouvement d'une structure contrôlée en tenant compte de l'effet de l'ISS.....	43
3.6	Equation d'état du modèle étudié.....	54
3.7	Conclusion	56

CHAPITRE 04 : Les algorithmes de contrôle actif

4.1	Introduction.....	58
4.2	Les stratégies du contrôle actif.....	58
4.2.1.	Le contrôle par rétroaction (<i>feedback</i>)	58
4.2.2.	Le contrôle par anticipation (<i>feedforward</i>)	59
4.3	Les systèmes de contrôle actif par rétroaction (<i>feedback</i>)	60
4.3.1	Contrôle de rétroaction en boucle ouverte (<i>Open-Loop</i>)	60
4.3.2	Contrôle de rétroaction en boucle fermée (<i>Closed-Loop</i>).....	61
4.3.3	Contrôle de rétroaction en boucle ouverte-fermée (<i>Open-Closed-Loop</i>)	63
4.4	Généralités sur les algorithmes de contrôle actif	64
4.4.1	Modèle du système.....	65
4.4.2	Algorithme optimale classique de contrôle linéaire de riccati ROAC.....	65
4.4.3	Algorithme de contrôle actif optimal instantané IOAC	70
4.4.4	Algorithme du contrôle actif optimal généralisé GOAC	75
4.4.5	Les matrices de pondération de ROAC, IOAC et GOAC.....	79
4.4.6	La solution technique	80
4.5	Conclusion	82

CHAPITRE 05 : Simulation numérique

5.1	Introduction	84
5.2	Programme élaboré	84
5.2.1	Description.....	84
5.2.2	Validation du programme	86
5.3	Etude paramétrique	93
5.3.1	Cas sans ISS.....	93

5.3.2 Cas avec ISS	107
5.4 Conclusion.....	132

CONCLUSION

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1.	Structures intelligentes [48].	6
Figure 1.2.	Définition d'une structure intelligente.	7
Figure 1.3.	Les cinq composants d'une structure intelligente.	7
Figure.1.4.	Schéma du Capteur [6].	8
Figure 1.5.	Deux types d'actionneurs.	9
Figure 2.1.	Diagramme de contrôle passif.	15
Figure 2.2.	Schéma de l'isolation parasismique [36].	16
Figure 2.3.	Effets d'une secousse sismique sur un bâtiment avec et sans isolation à la base.	16
Figure 2.4.	Isolateurs de bases à déformations [37].	17
Figure 2.5.	Schémas de l'isolateur de type pendule à friction.	18
Figure 2.6.	Amortisseurs visqueux [66].	18
Figure 2.7.	Amortisseurs hystérétique [66].	19
Figure 2.8.	Amortisseur à friction [66].	19
Figure 2.9.	Schéma du TMD sur la structure [7].	20
Figure 2.10.	Schéma des types de TMD.	21
Figure 2.11.	Schéma d'un amortisseur TLD.	21
Figure 2.12.	Schéma d'un amortisseur TLCD.	22
Figure 2.13.	Le Centre Mural à Vancouver.	23
Figure 2.14.	Diagramme schématique d'un système de contrôle actif.	24
Figure 2.15.	Une structure avec un système AMD.	25
Figure 2.16.	Configuration d'un tendon actif [7].	25
Figure 2.17.	Diagramme schématique d'un système de contrôle semi-actif [7].	26
Figure 2.18.	Schématization inertielle du contrôle passif et actif [66].	27
Figure 2.19.	Contrôle semi-actif inertiel [66].	27
Figure 2.20.	Schéma d'un amortisseur à fluide MR adapté de Carlson en 2007[43].	28
Figure 2.21.	Un amortisseur à masse hybride [67].	29
Figure 2.22.	Schéma d'un amortisseur de masse hybride.	29

Figure 3.1.	Modélisation de l'ISS par la méthode globale [53].	34
Figure 3.2.	Méthode de réduction de domaine.	37
Figure 3.3.	Les deux sous-structures : sol et structure rigide avec interface sol-structure [29].	39
Figure 3.4.	Sous-structure : sol sans limite.	40
Figure 3.5.	Le mouvement en Champ libre et le mouvement d'entrée en vigueur de la fondation pour que l'excitation sismique se propagent verticalement [29].	41
Figure 3.6.	Modèle d'une structure équipée par des tendons actifs et avec ISS.	43
Figure 3.7.	Les déplacements de la structure $xst(n)$ et de la fondation $x0t(n)$.	45
Figure 3.8.	La partie du sol excavé.	49
Figure 3.9.	Application de la méthode sous structure et représentation de degré de liberté vertical.	50
Figure 3.10.	Représentation des degrés de libertés de la masse du sol emprisonnée [29].	52
Figure 4.1.	Principe de contrôle actif par rétroaction (feedback)[47].	59
Figure 4.2.	Principe de contrôle actif par anticipation (feedforward) [47].	59
Figure 4.3.	Le principe de fonctionnement du contrôle actif par rétroaction [9].	60
Figure 4.4.	Schéma de contrôle actif en boucle ouverte [7].	60
Figure 4.5.	Application de contrôle actif en boucle ouverte [7].	61
Figure 4.6.	Le Schéma du principe de contrôle actif en boucle fermée [7].	62
Figure 4.7.	Application de contrôle actif en boucle fermée [7].	62
Figure 4.8.	Schéma de contrôle actif en boucle ouverte-fermée [7].	63
Figure 4.9.	Application de contrôle actif en boucle ouverte-fermée [7].	64
Figure 4.10.	Un élément de la matrice de Riccati $P(t)$ [59].	69
Figure 4.11.	La variation de la fonction f à l'intervalle $ti - 1, ti$.	77
Figure 4.12.	Organigramme de la résolution de l'équation d'état avec le contrôle actif.	79
Figure 5.1.	L'organigramme de la simulation.	85
Figure 5.2.	El-Centro 1940 du composantes N-S.	86
Figure 5.3.	Le déplacement du premier étage sans contrôle a) suivant la référence [15] et b) suivant notre programme.	87
Figure 5.4.	Les caractéristiques du modèle étudié avec contrôle [7].	89

Figure 5.5. Le déplacement du dernier étage du modèle étudié avec contrôle par IOAC et GOAC selon la a) référence [7] et b) notre programme.	90
Figure 5.7. Le déplacement du dernier étage du modèle avec contrôle suivant a) la référence [7] et b) notre programme tel que $S/R=0.6$	92
Figure 5.8. Une structure à un seul étage.	93
Figure 5.9. Influence du rapport a) Q/R dans l'algorithme IOAC et b) S/R dans l'algorithme GOAC sur le déplacement et la force de contrôle maximum de la structure à un seul étage.	94
Figure 5.10. a) Le déplacement, b) la vitesse et c) l'accélération de la structure à un seul étage avec contrôle par la trois algorithmes en comparant avec le cas sans contrôle.	95
Figure 5.11. a) La force de contrôle de la structure étudiée et b) la force de contrôle en fonction de déplacement de la structure étudiée ($t=4$ s) par les trois algorithmes ROAC, IOAC et GOAC en comparant avec le cas sans contrôle.	96
Figure 5.12. Structure à 08 étages [7].	97
Figure 5.13. a) Le déplacement, b) la vitesse et c) l'accélération du dernier étage de la structure à 8 étage sans contrôle.	98
Figure 5.14. Influence du rapport a) Q/R dans l'algorithme IOAC et b) S/R dans l'algorithme GOAC sur le déplacement et la force de contrôle maximum du dernier étage de la structure à 08 étages.	99
Figure 5.15. Déplacement, Vitesse et Accélération maximums de la structure à 08 étage par les trois algorithmes ROAC, IOAC et GOAC et le cas sans contrôle.	100
Figure 5.16. a) Le déplacement du dernier étage et b) la force de contrôle de la structure à 08 étages par les trois algorithmes ROAC, IOAC et GOAC.	101
Figure 5.17. Structure à 15 étages [59].	102
Figure 5.18. Influence du rapport a) Q/R dans l'algorithme IOAC et b) S/R dans l'algorithme GOAC sur le déplacement et la force de contrôle maximum du dernier étage (structure à 15 étages).	103
Figure 5.19. L'influence de l'incrément du temps sur le déplacement, la vitesse et l'accélération maximums (structure à 15 étages).	104
Figure 5.20. Changement de la position du tendon actif a) Position A : Tendon actif dans le dernier étage, b) Position B : dans le 8ème étage, et c) Position C : dans le premier étage.	105
Figure 5.21. Effet de la position du tendon actif sur la réponse structurelle (structure à 15 étages).	106
Figure 5.22. L'effet de la position des tendons actifs sur la force de contrôle (structure à 15 étages).	107

Figure 5.23. Le modèle étudié.....	108
Figure 5.24. a) Le déplacement, b) la vitesse et c) l'accélération du dernier étage du modèle étudié en tenant compte de l'effet d'ISS en comparant avec le cas encasté sans contrôle.....	110
Figure 5.25. Le déplacement du dernier étage et la force de contrôle maximum pour différents valeurs de S/R du modèle étudié.	110
Figure 5.26. Le déplacement, vitesse et accélération maximum des sommets du modèle étudié avec ISS avec et sans contrôle en comparant avec le cas d'encastrement.	111
Figure 5.27. a) Le déplacement, b) la vitesse et c) l'accélération du dernier étage du modèle étudié avec ISS avec et sans contrôle en comparant avec le cas d'encastrement.	113
Figure 5.28. a) Le déplacement, b) la vitesse et c) l'accélération du fondation avec et sans contrôle.....	114
Figure 5.29. a) La rotation, b) la vitesse de rotation et c) l'accélération de rotation du fondation avec et sans contrôle.	115
Figure 5.30. a) La force de contrôle et b) La relation force-déplacement du dernier étage du modèle étudié.	116
Figure 5.31. Le modèle du sol pour l'application numérique.	117
Figure 5.32. Le modèle de la structure étudiée.	118
Figure 5.33. Le déplacement du dernier étage et la force de contrôle maximum pour différents valeurs de S/R de la structure à 06 étages.....	119
Figure 5.35. Le déplacement, la vitesse et l'accélération maximums des étages du modèle étudié avec et sans contrôle en tenant compte de l'effet de l'ISS en comparant avec le cas d'encastrement.....	120
Figure 5.35. Le déplacement, la vitesse et l'accélération du dernier étage du modèle étudié avec et sans contrôle en tenant compte l'effet de l'ISS en comparant avec le cas d'encastrement.	121
Figure 5.36. Le déplacement, la vitesse et l'accélération de la fondation du modèle étudié avec et sans contrôle.	122
Figure 5.37. a) La rotation, b) la vitesse de rotation et c) l'accélération de rotation de la fondation du modèle étudié avec et sans contrôle.....	123
Figure 5.38. a) La force de contrôle et b) La relation force-déplacement du dernier étage du modèle étudié.	124
Figure 5.39. Le déplacement, la vitesse et accélération maximums des étages de l'exemple étudié.....	125
Figure 5.40. a) Le déplacement du dernier étage et b) la force du contrôle du modèle étudié pour les trois positions.	126

Figure 5.41. Le déplacement, la vitesse et accélération maximums des étages du modèle étudié.....	127
Figure 5.42. a) Le déplacement du dernier étage et b) la force du contrôle du modèle étudié pour les trois positions.	128
Figure 5.43. La relation force-déplacement du dernier étage du modèle étudié par les trois positions.	129
Figure 5.44. L'influence du nombre des contrôleurs sur le déplacement, vitesse et accélération maximum de la structure à 03 étages.....	130
Figure 5.45. L'influence du nombre des contrôleurs sur la force de contrôle de la structure à 03 étages.....	131
Figure 5.46. L'influence du nombre des contrôleurs sur le déplacement, vitesse et accélération maximum de la structure à 06 étages.....	132

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1. Les caractéristiques du modèle [21].	88
Tableau 5.3. La matrice de la rigidité du sol K00 .	108
Tableau 5.4. Les pulsations propres du modèle étudié avec et sans ISS.	109
Tableau 5.5. La matrice de la rigidité du sol K00 .	117
Tableau 5.6. Les pulsations propres pour différents sol en comparant avec le cas d'encastrement.	118
Tableau 5.7. Les positions des contrôleurs dans le modèle.	129
Tableau 5.8. Les positions des contrôleurs dans la structure à 06 étages.	131

LISTE DES SYMBOLES UTILISES

$[A]$	La matrice caractéristique du système contrôlé
$\{A\}$	Le vecteur de la contrainte cinématique
$[B]$	La matrice de localisation des actionneurs
$\{C\}$	Le vecteur lié à l'accélération de base de structure
$[C]$	La matrice d'amortissement du système
C_{cc}	La matrice d'amortissement des nœuds appartenant à la frontière du domaine extérieur
$[C_{SS}]$	La matrice d'amortissement des poteaux symétriques de la structure
$[C_{oS}], [C_{S0}]$	La matrice d'amortissement lié à la superstructure et à la fondation rigide
$[C_{00}]$	La matrice d'amortissement lié à la fondation rigide
$[D]$	La matrice "plant" de système contrôlé
d.d.l	Le degré de liberté
$\{E\}$	Le vecteur de perturbations externes
e	La profondeur du sol fouillé dans le demi-espace
$F(t)$	Le vecteur des forces d'excitation sismique agissant à la base du modèle
$[F_{00}^g(\tau)]$	La matrice de la flexibilité dynamique du sol.
$[G(w)]$	La matrice de la flexibilité dynamique du système sol-structure.
$[G^{ISS}(t)]$	La matrice de gain de feedback
h_i	La hauteur de l'étage i
ha_i	La hauteur entre le point de rotation et le centre de gravité de la masse m_i .
ha_0	La hauteur entre le point de rotation et le centre de gravité de la fondation.
I_i	Le moment d'inertie par rapport au point 0 du $i^{\text{ème}}$ étage.

I_0	Le moment d'inertie par rapport au point 0 de la fondation
I	Le vecteur de couplage dynamique
J	L'indice de performance
$[K]$	La matrice rigidité du système
K_{cc}	La matrice masse des nœuds appartenant à la frontière du domaine extérieur
$[K_{SS}]$	La matrice masse des poteaux symétriques de la structure
$[K_{oS}], [K_{S0}]$	Les matrices rigidités lié à la superstructure et à la fondation rigide
$[K_{00}]$	La matrice rigidité lié à la fondation rigide
k_i	La rigidité de l'étage i
k_0	La rigidité de la fondation
$[\tilde{K}_{00}]$	La matrice de La rigidité du sol
$[M]$	La matrice masse du système
M_{cc}	La matrice masse des nœuds appartenant à la frontière du domaine extérieur
$[M_{SS}]$	La matrice masse des poteaux symétriques de la structure
$[M_{oS}], [M_{S0}]$	La matrice masse lié à la superstructure et à la fondation rigide
$[M_{00}]$	La matrice masse lié à la fondation rigide
$\{M(w)\}$	Le vecteur des moments agissant sur la structure
m_i	La masse de l'étage i
m_0	La masse de la fondation
NCR	Le nombre de contrôleur actifs.
$\{P(w)\}$	Le vecteur des amplitudes des charges agissant sur la structure.
$\{P_S(w)\}$	Le vecteur des amplitudes concerne la structure.
$\{P_0(w)\}$	Le vecteur des amplitudes concerne l'interface sol-structure.
$[P(t)]$	La matrice de Riccati,
P_{eff}	Le vecteur des forces fictives
$[O(t)]$	La matrice de contrôle en boucle ouverte.
$Q_0(w)$	La force agissant sur la base de fondation.

[Q]	La matrice d'état de pondération semi définie positive
$\{R_0(n)\}$	La force d'interaction sol-structure.
$R_x(n)$	La force d'interaction horizontale
$R_\theta(t)$	Le moment d'interaction au point 0.
$\{\check{R}_0(n)\}$	Le vecteur des accélérations
$\{\tilde{R}_0\}$	Le vecteur dynamique des forces équivalentes
[R]	La matrice d'état de pondération définie positive
r_0	Le rayon de la partie du sol fouillé
$[S(t)]$	La matrice de gain de feedback en boucle ouverte
$[S_{00}^g(w)]$	La matrice de la rigidité dynamique du sol.
$[S^f(w)]$	La matrice de la rigidité dynamique en champ libre,
$[S_v^f(w)]$	La matrice de la rigidité dynamique concerne la rotation.
[T]	La matrice de transformation modale d'équation d'état
t	Le temps
t_i	Le temps initial
t_f	Le temps final
u	Le vecteur de déplacement ou vecteur d'interaction
$\{u^t(w)\}$	Le déplacement total.
$\{u_s^t(w)\}$	Le déplacement concerne la structure.
$\{u_0^t(w)\}$	Le déplacement concerne l'interface sol-structure.
$\{u_0^g(w)\}$	Les excitations sismiques
u_e	Le déplacement total des points appartenant au domaine extérieur
$\ddot{u}_g(t)$	Les accélérations sismiques
V	Le vecteur des déplacements du sol en champ libre.
V_e	Le déplacement relatif,
w_e	Le déplacement résiduel.
w_i	Les pulsations propres

$\{Z(t)\}$	Le vecteur d'état du système
$\{\delta\}$	Le vecteur d'accélération horizontal du sol
$\{\delta_S\}$	Le vecteur d'accélération horizontal du sol pour la superstructure
$\{\delta_0\}$	Le vecteur d'accélération horizontal du sol pour la fondation
$[\gamma]$	La matrice de localisation des contrôleurs
$[\gamma_S]$	La matrice de localisation des contrôleurs de la superstructure
$[\gamma_0]$	La matrice de localisation des contrôleurs de la fondation
λ	Le multiplicateur de Lagrange
β_i	Le rapport d'amortissement des modes de translations de la fréquence w_i .

INTRODUCTION

Actuellement, l'atténuation contre les risques naturels est l'un des enjeux les plus importants en génie civil.

Les structures du génie civil, dont les dimensions sont de plus en plus importantes, nécessitent une surveillance étroite de la part de leurs exploitants. Celles-ci sont en effet soumises à de nombreux risques naturels ou liés à l'activité humaine.

Pour cela, la bonne connaissance du comportement des structures est très importante. Ces structures étant fondées sur les sols par lesquels sont transmises des sollicitations sismiques. En cas de séisme, il faut bien connaître le fonctionnement de l'ensemble du système sol-structure, ce phénomène est désigné sous le nom « *Interaction Sol-Structure* ». Malgré le grand problème causé par ce phénomène, les ingénieurs ne prennent pas en considération l'effet de l'interaction sol-structure dans les études des structures courantes, car, le plus simple c'est d'utiliser un modèle avec un encastrement parfait à la base.

En génie parasismique, le défi majeur est de trouver de nouvelles techniques permettant aux habitations de résister au mieux aux tremblements de terre. La solution utilisée ces dernières années est la technologie des structures intelligentes. En 1960, un certain nombre de structures de génie civil ont été instrumentées avec des systèmes de surveillance pour mesurer leur performance au cours des grandes perturbations externes telles que les séismes ou les grands vents [30]. La technique proposée par Yao en 1972 est d'utiliser un système de contrôle structural. Cette technique a été largement acceptée comme un moyen efficace pour la protection des structures contre les risques sismiques. La première structure employant des capteurs et actionneurs pour le contrôle de sa réponse lors du chargement dynamique a été construite en 1989 [30].

L'objectif de ce travail est de comprendre les phénomènes d'interaction sol-structure et l'importance du contrôle actif. Ce travail est développé en cinq chapitres :

Le premier chapitre comporte une introduction générale définissant les matériaux intelligents et les structures intelligentes qui sont destinées à être une partie importante de la révolution technologique qui transforme la pratique du génie et de changer l'interface et l'expérience humaine avec l'environnement naturel et le bâti.

Le deuxième chapitre présente une étude bibliographique, on va étudier les différents types de contrôles existants dans les structures en génie civil, leurs importances et à quoi sert chaque type de contrôle.

Le troisième chapitre explique le phénomène d'interaction sol-structure, ainsi que les différentes méthodes de calcul de l'effet de l'ISS.

Le quatrième chapitre comporte en détail les algorithmes de contrôle actif, et en deuxième partie nous entamons une application numérique par des modèles de bâtiments.

Dans le dernier chapitre, nous menons une simulation numérique du comportement dynamique des structures intelligentes en tenant compte de l'effet de l'ISS. On commence par une présentation et une validation de notre programme, puis, une étude paramétrique pour montrer l'influence et l'importance de certains paramètres clés.

Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale qui présente les grandes lignes du travail effectué et souligne les différents résultats obtenus.

CHAPITRE 01

Structures intelligentes

1.1 Introduction

Une structure est un système qui est conçu pour effectuer et transmettre les charges sans subir des dommages irréparables au cours de sa durée de vie. La surveillance des structures est un domaine relativement nouveau aux multiples facettes, et dans un grand nombre de cas, les ingénieurs commencent à s'imposer, qu'il s'agisse du génie civil, ou des secteurs d'emploi des matériaux composites.

Actuellement en génie civil, le problème posé à l'ingénierie dans le monde est la conception des structures en génie civil tel qu'elles peuvent résister aux forces et satisfaire les déformations qui sont incitées pendant un événement sismique, et contre les dommages induits par les grandes charges de l'environnement. Une solution proposée pour limiter la réponse des structures, c'est d'ajouter des éléments structuraux plus forts qui ne sont plus économiques, mais une autre solution utilisée ces dernières années c'est la technologie des systèmes mécaniques intelligents.

On les appelle « **intelligents** ou **Smart** » parce que leur développement repose sur des fonctions généralement associées à l'intelligence : capacités sensorielles, mémoire, communication, traitement de l'information et comportement adaptatif. Et aussi ils ont pour objectif de simplifier certaines tâches pour l'utilisateur. Ainsi, l'intelligence peut être définie comme la capacité à apprendre ou à comprendre ou à faire face à de nouvelles situations.

Cette technologie s'intègre dans un domaine du génie qui regroupe plusieurs sciences telles que technologie des capteurs, contrôle structural, surveillance de santé structurale, traitement de l'information et de design des systèmes innovants structurel avec des fonctions adaptatives, la construction et l'entretien des ouvrages de génie civil. Mais l'application de cette discipline est limitée malgré qu'elle ait connu une évolution rapide ces dernières années dans le monde.

L'intérêt d'une telle démarche est de faciliter la prise en compte de l'usage dans la construction, pour concevoir des produits mieux adaptés aux besoins réels des usagers, assurer la stabilité et la durabilité des structures, et l'amélioration de la capacité des structures et le cycle de vie.

1.2 La technologie des systèmes intelligents

Le défi majeur de l'ingénierie structurelle d'aujourd'hui est l'application de la nouvelle technique des systèmes intelligents dans le monde, parce que c'est une méthode plus efficace dans la protection des structures. Ces systèmes ont pour but d'absorber l'énergie dommageable et de neutraliser la force (vent, séisme, ...etc.) néfaste sur la structure, et cela manifeste par la réduction de la réponse structurelle et les dommages éventuels.

D'après **G. AKHRAS [1]** : «*Les systèmes intelligents sont issus d'un domaine de recherche qui envisageait des dispositifs et des matériaux qui pourraient imiter le système musculaire et le système nerveux humain.* ».

Actuellement, plusieurs définitions des systèmes intelligents existent dont l'application en génie civil est de plus en plus répandue.

Un système intelligent est un ouvrage d'art avec des fonctionnalités ajoutées, dont l'objectif est de fournir une force supplémentaire par le renforcement ou la rigidité [44]. Le concept de structures intelligentes a été appliqué dans les industries aérospatiale et mécanique, comme les systèmes de structure de suivi des avions et amortisseurs de vibrations de l'automobile [7]. Dans le domaine de l'ingénierie aérospatiale les systèmes intelligents ont été définis comme un système qui peut détecter les dommages, limiter la propagation des dommages, et contrôler la réponse de perturbation externe [41]. L'utilisation de cette technique offre le potentiel pour contrôler la forme de précision et la correction de la déformation des structures spatiales [26].

1.3 Définition d'une structure intelligente

Dans la littérature, en général, les structures sont classées en quatre catégories dont la compréhension de l'intitulé de chacune d'elle nous permet de bien définir les structures intelligentes (figure 1.1) [48] :

- i) **Structure sensible**
Elle comprend des capteurs ou senseurs susceptibles d'apporter au système des informations sur l'environnement ou elle-même et de les transmettre à son utilisateur.
- ii) **Structure adaptable**
Elle comprend des actionneurs pouvant modifier leurs caractéristiques. Ainsi, la structure s'adaptera à l'environnement.
- iii) **Structure adaptative**
Le matériau est à la fois sensible et adaptable. Il réagit à un seul type de sollicitation suivant une loi de comportement bien définie. Ce type de réaction nécessite la présence d'un processeur assurant un lien entre la fonction capteur et la fonction actionneur.
- iv) **Structure intelligente**
C'est une structure qui réagit à un ensemble de sollicitations en fonction de sensibilités qui lui seront proposés. Elle aura, par exemple, la possibilité de choisir la réponse la mieux adaptée parmi un ensemble de solutions possibles si la structure du processeur le permet, d'où la notion d'intelligence. En fait, un matériau réellement "intelligent" n'existe pas car il serait alors capable d'intuition créative devant une situation inattendue.

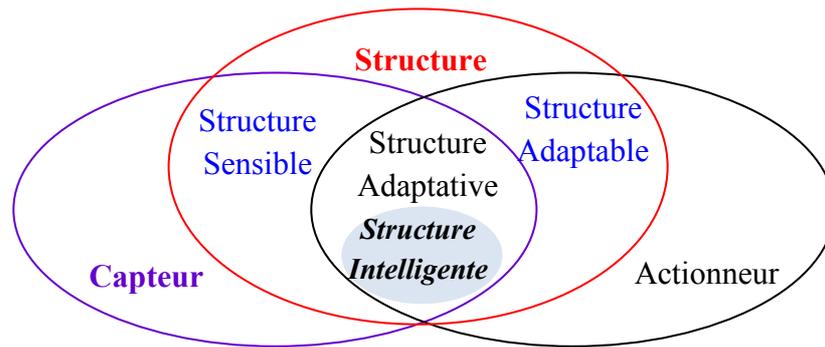


Figure 1.1. Structures intelligentes [48].

Mais dans la pratique, les structures intelligentes peuvent être classées en fonction de leur fonctionnalité et leur adaptation à l'évolution de la situation [44] :

- i) **Intelligence passif (Passif Smart)**
C'est une structure où on fournit à la structure des fonctionnalités supplémentaires liées à la rigidité et la force dans un mode passif, impliquant aucune forme de production d'énergie interne ou entrées,
- ii) **Intelligence active (Actif Smart)**
C'est une structure où on a fournit des ajustements dans les fonctionnalités spécifiques de la structure aux intrants tels que la modification de la rigidité ou de la force en réponse à une entrée contrôlable.
- iii) **Intelligente (Smart)**
C'est une structure qui s'adapte avec le changement naturel, et également nécessitant une forme de l'intelligence de la commande d'actionnement sous la forme d'une boucle de rétroaction.

La définition des structures intelligentes a été un sujet de controverse de la fin des années 1970 à la fin des années 1980 [61].

Le terme « **Smart Structure** » concerne les structures capables de sentir et réagir à son environnement grâce à une stratégie de contrôle [27].

Une structure intelligente : comporte cinq éléments (Figure 1.2) [62] : des éléments de structure, la stratégie de contrôle, l'électronique de conditionnement de puissance, ainsi des actionneurs et des capteurs distribués, ces derniers sont fabriqués à partir des matériaux intelligents capables de fournir une action distribuée et générée par le couplage naturel de leurs déformations ou contraintes externes comme des champs électrique, magnétique ou de température, ...etc. [56]. Ces actionneurs et capteurs sont très intégrés dans la structure par collage de surface ou enrobage sans provoquer des changements significatifs dans la rigidité de masse ou structurelle du système [35].

Avec ces cinq composantes, la structure intelligente a la capacité de répondre et détecter tout changement dans l'environnement ou du système tel que les charges, les températures et les changements [63]. Cette structure peut aussi diagnostiquer tout problème aux endroits

critiques, stocker et traiter des données mesurées, et prendre l'action de commande appropriée pour améliorer les performances du système et préserver l'intégrité structurelle [7].

Les mesures fournies par le capteur sont traitées par un système de contrôle, qui envoie un signal à l'actionneur pour modifier le comportement de la structure, l'adaptant à un comportement requis [56].

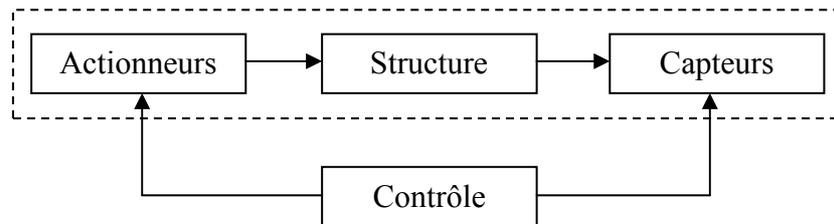


Figure 1.2. Définition d'une structure intelligente.

La particularité des structures intelligentes, c'est que les actionneurs et les capteurs sont souvent distribués et ont un degré élevé d'intégration à l'intérieur de la structure, ce qui rend une modélisation séparée impossible.

1.4 Le rôle des composants fondamentaux d'une structure intelligente

On a déjà dit que la structure intelligente comporte cinq éléments, et chaque élément a un rôle bien précis dans la structure (figure 1.3) :

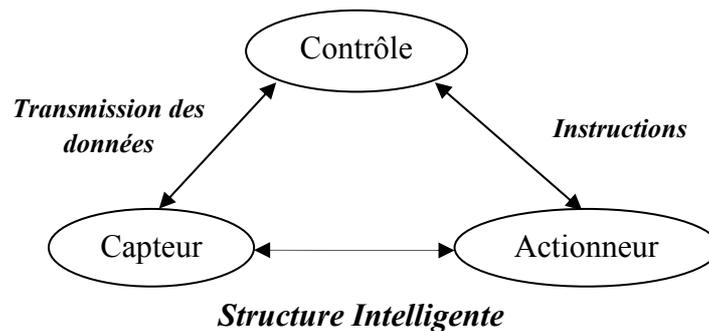


Figure 1.3. Les cinq composants d'une structure intelligente.

1.4.1 Les capteurs

Les capteurs sont des dispositifs qui permettent de transformer l'état d'une grandeur physique observée dans une certaine zone en une grandeur manipulable par l'utilisateur. Le capteur est au minimum composé d'un transducteur dont le rôle est de transformer la grandeur à mesurer en information interprétable. Il peut en plus être constitué d'un système de transport de l'information : fil électrique ou fibre

optique. Il convient en général de distinguer le capteur de l'instrument de mesure (Figure.1.4), qui comporte en plus un affichage et un traitement informatique des données [33]. Les capteurs sont conçus en fonction de la nature de phénomène à capter et des résultats voulus, et d'autres caractéristiques tel que : la taille, la configuration, les propriétés mécaniques de l'interface requise,...etc. Ce composant sert à recueillir les données brutes nécessaires pour capter et surveiller correctement la structure [1].

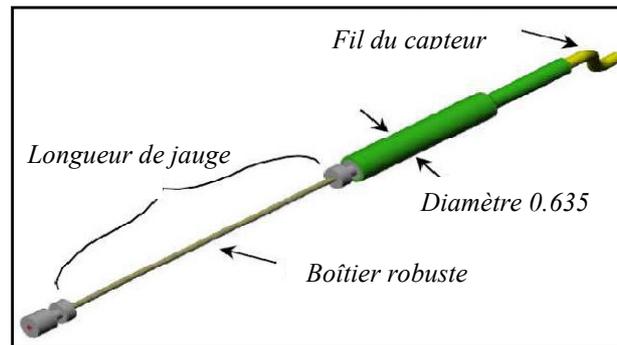


Figure.1.4. Schéma du Capteur [6].

La production de capteur est d'habitude en forme des signaux de tension qui sont envoyés au contrôleur pour le traitement [7].

1.4.2 Transmission des données

Ce composant sert à envoyer les données brutes aux unités locales et/ou à l'unité centrale de commande et de contrôle [1].

1.4.3 Unité de commande et de contrôle

Ce composant a pour but de gérer et surveiller la santé et l'intégrité du système par un réseau de communication qui fonctionne en temps réel. Cet élément joue le rôle de cerveau dans la structure, parce qu'il contrôle le groupe d'instruments intégrés dans la structure. Ce qui sert à remplir deux fonctions élémentaires distinctes [1] :

i) **La fonction de traitement**

L'unité reçoit et stocke l'information, l'analyse et la classe en fonction de sa nature, de sa fréquence et de la qualité et l'origine de ces données, par des systèmes experts.

ii) **La fonction d'analyse**

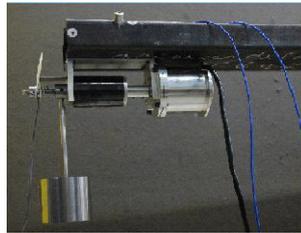
L'unité examine les données à partir de l'analyse (fonction de traitement), qui permet de trouver et identifier les variables et les caractéristiques pour que si l'unité découvre un problème envoie ces mesures aux dispositifs de contrôle.

1.4.4 Instruction

Ce composant transmet les décisions prises et les instructions connexes aux composants de la structure [1].

1.4.5 Les actionneurs

Ce composant sert à fournir une force nécessaire ou une réaction pour activer les dispositifs de contrôle [1]. Ainsi, il permet de convertir l'énergie qui lui est fournie en un travail utile à l'exécution de système.



a) Un type d'actionneur placé dans un pont.



b) Un actionneur placé dans un portique [65].

Figure 1.5. Deux types d'actionneurs.

1.5 Matériaux intelligents

Les matériaux intelligents représentent une technologie habilitante qui a des applications dans une large gamme des secteurs, y compris la construction, le transport, l'environnement, l'espace et la défense ...etc. Cette technologie des matériaux intelligents est relativement nouvelle pour l'économie et a un fort contenu innovant, et si elle est bien prise en charge peut vraiment avoir un impact significatif dans de nombreux secteurs du marché. Ainsi créer de fortes valeurs ajoutées pour le progrès des possibilités dans la construction et dans le monde en général.

Les matériaux intelligents sont des matériaux qui détectent leur environnement et y réagir [49]. Les matériaux intelligents sont aussi appelés matières sensibles car ils répondent à des stimuli environnementaux d'une façon contrôlée (tels que la température, l'humidité, le pH, ou des champs électriques et magnétiques...etc.), avec des changements particuliers de

certaines variables [45]. Ces changements concernent par exemple sa forme et sa connectivité, sa viscoélasticité ou sa couleur [48].

Il existe actuellement plusieurs types de matériaux intelligents, tel que :

Les matériaux piézo-électriques sont les plus utilisés pour plusieurs raisons. L'effet piézoélectrique a été découvert en 1880 par les frères Jacques et Pierre Curie. Ils ont découvert que lorsqu'on applique une contrainte mécanique sur les cristaux (tels que le quartz, le sel de Rochelle et la canne à sucre), on voit une tension des charges électriques, cette tension est proportionnelle à la contrainte appliquée, et elle est réversible. L'effet piézo-électrique est particulièrement utile pour convertir une contrainte mécanique en impulsions électriques et convertissant les impulsions électriques en contrainte mécanique.

Alliages à mémoire de forme ont été découverts par le Laboratoire Naval ordonnance et sont en nickel-titane à base de matériaux [23]. Ils sont très connus pour leurs propriétés thermomécaniques inhabituelles, ces propriétés sont observées par Arne Olander pour la première fois en 1938 [64].

Il ya encore quelques difficultés avec des alliages à mémoire de forme qui doivent être surmontés avant de pouvoir vivre à leur plein potentiel. Ces alliages sont encore relativement coûteux à fabriquer et la machine par rapport à d'autres matériaux comme l'acier et l'aluminium. La plupart des alliages à mémoire de forme ont de mauvaises propriétés de fatigue, ce qui signifie que, bien que dans les conditions de chargement mêmes (c.-à-torsion, flexion, compression) un élément en acier peut survivre pendant des cycles de plus de cent fois plus que d'un élément d'alliage à mémoire de forme.

1.6 Conclusion

Ce chapitre montre l'importance de la technologie des structures et des matériaux intelligents en génie civil.

Mais malgré cette importance dans la vie humaine; le recours à ce genre de technologie parasismique demande souvent des aptitudes techniques et un matériel très sophistiqué, ce qui rend leur utilisation délicate.

CHAPITRE 02

Contrôle des structures

2.1 Introduction

La technologie des structures intelligentes comprend au moins deux domaines principaux : le contrôle de santé des structures et le contrôle structurel. Le contrôle de santé de la structure (*Structural Health Monitoring*) est pour mesurer les réponses structurelles, identifier et localiser l'apparition des dommages structurels pour réparer ces points faibles, ce domaine est développé par : *Farrar et al.* 2003, *Sohn et al.* 2003, *Chang* 2009. Le contrôle structurel est défini comme un système mécanique installé dans une structure pour réduire les vibrations structurelles pendant les chargements tels que les vents, les tremblements de terre...etc. Il est développé par *Yao* 1972, *Soong* 1990, *Housner et al.* 1997, *Spencer et Nagarajaiah* 2003.

Dans ce chapitre on va traiter en détail le contrôle structurel. L'intérêt de contrôle des structures en génie civil revêt divers aspects, évoqué dans plusieurs projets scientifiques, tels que l'accroissement de la productivité des chantiers, de la durée de vie de l'ouvrage ou de ses composants, l'adaptation des ouvrages existants à une évolution des niveaux de performances requises ou de l'environnement, le confort, l'économie de matériaux,...etc.

En parasismique le contrôle structurel est défini comme un nouveau mode de protection, qui cette fois-ci ne se propose plus d'absorber l'énergie d'un séisme par un renforcement de la structure elle-même, afin de la rendre résistante, mais par l'adjonction de dispositifs spéciaux visant à contenir ou contrôler la réponse de la structure lors de l'arrivée d'une onde sismique par le sol. Notons également que certains de ces systèmes de contrôle de la réponse, sont utilisés pour protéger des structures contre d'autres risques que le risque sismique, tels que le vent, des risques dus à des équipements spéciaux (machinerie lourde transmettant de fortes vibrations à travers la structure...), des impacts externes réguliers ou non (vagues, avalanches, mouvements de fluides, ondes de choc...), etc.

Ce système de contrôle structurel peut être divisé en deux parties, une partie concerne les dispositifs de contrôle réel qui seront détaillés dans ce chapitre, et une partie concerne les algorithmes de contrôle qui seront détaillés dans le chapitre 04. Il est commun pour que le système de contrôle structurel soit classifié par son type de dispositif ayant pour résultat trois types généraux de contrôle : passif, actif et semi actif. Il y a aussi un autre type de contrôle c'est le contrôle hybride qui utilise une combinaison de système de contrôle passif et actif.

2.2 Contrôle passif

Un système de contrôle passif est un système dans lequel les vibrations structurelles sont réduites par un dispositif, qui donne une force sur la structure en réponse à son mouvement. Le contrôle passif présente certains avantages. D'abord, il ne nécessite pas une source d'énergie externe pour son fonctionnement ce qui le rend plus économique que les autres systèmes. De plus, il est de taille plus petite nécessitant un espace réduit pour son installation. Enfin, du à sa simplicité ce type de contrôle a connu beaucoup d'attention de la part des chercheurs le rendant plus fiable à utiliser [34].

Les techniques passives d'amortissement des vibrations structurales utilisent l'intégration ou l'ajout de matériaux ou systèmes, possédant des propriétés amortissantes, couplés à la

structure de telle façon que les vibrations de la structure sont amorties passivement, c'est-à-dire, sans aucune intervention extérieure supplémentaire [57].

Le contrôle passif de la réponse d'une structure consiste à changer la période de sa réponse par oscillation, le plus souvent en l'allongeant considérablement ainsi que ses capacités d'amortissements [37]. Ce type de contrôle consiste en l'utilisation d'une variété de dispositifs d'amortissement comme illustrés dans la figure 2.1, ces systèmes placés soit au sein de la structure, soit à sa base, soit en toiture. On peut les classer en trois familles selon leur mode travail : système d'isolation à la base, système de dissipation d'énergie passif, et le système d'absorption d'énergie.

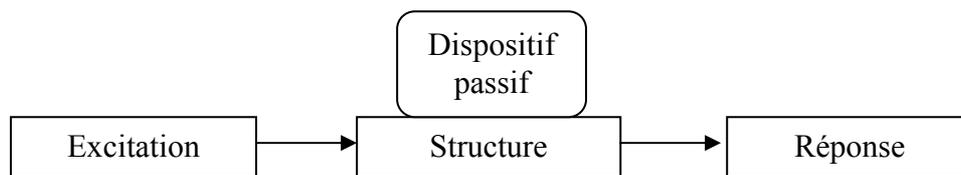


Figure 2.1. Diagramme de contrôle passif.

2.2.1 Systèmes d'isolation sismique

L'isolation sismique est une approche de conception parasismique qui est basée sur le découplage du mouvement du sol à celui de la structure ce qui provoque une réduction des efforts appliqués sur la structure lors d'un séisme. Les premières expériences du principe d'isolation sismique remontent au début du 20^{ème} siècle, et la première application de la technologie moderne de l'isolation sismique a été réalisée en 1969 [3].

L'isolation à la base repose sur le principe d'augmentation de la période de vibration pour s'éloigner de la période d'excitation prédominante du tremblement de terre, ce qui implique une réduction dans les accélérations transmises à la structure. En revanche, l'augmentation de la période engendre des déplacements plus importants concentrés au niveau de l'isolateur sismique.

Les forces sismiques exercées sur la structure isolée sont typiquement de l'ordre de 3 à 10 fois plus petites que la demande en force sur la structure non isolée. L'isolateur capte les déformations et filtre les accélérations de sorte que la superstructure isolée se déplace essentiellement selon un mode rigide subissant de faibles accélérations et presque pas de déformations. Par conséquent, les forces d'inertie transmises aux éléments de fondations sont limitées et demeurent en deçà de la capacité élastique de tels éléments (figure 2.2).

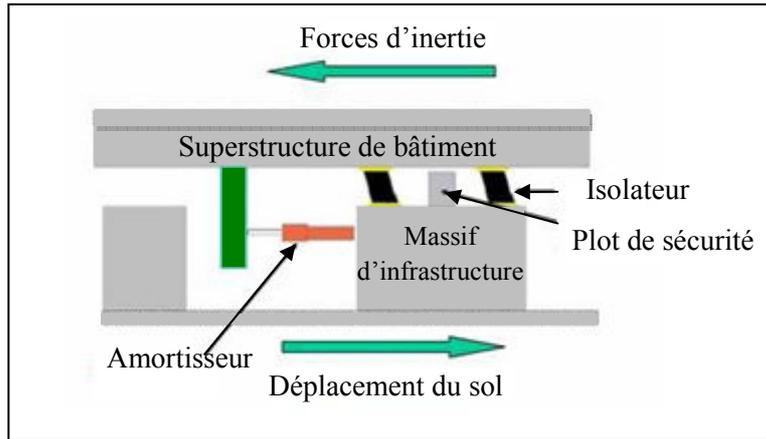
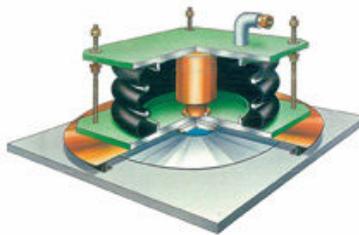


Figure 2.2. Schéma de l'isolation parasismique [36].

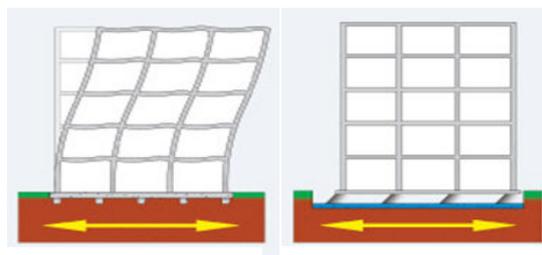
Les systèmes d'isolations sismiques sont composés principalement par (figure 2.3.a) [3] :

- i) Le noyau de l'isolateur
C'est un appui utilisé pour transmettre les charges verticales, mais ayant une faible rigidité horizontale.
- ii) Dispositif de dissipation d'énergie
Ce dispositif sert à contrôler la déformation de l'isolateur et par conséquent le déplacement absolu de la superstructure située au-dessus.
- iii) Un système de retenue
Le système d'isolation doit avoir une rigidité initiale élevée afin de minimiser les déplacements sous les charges de service tel que le freinage et le vent.

La figure 2.3.b) illustre l'effet d'un dispositif d'isolation à la base :



a) Un isolateur sismique.



b) Un bâtiment avec et sans isolation.

Figure 2.3. Effets d'une secousse sismique sur un bâtiment avec et sans isolation à la base.

a) Isolation par appuis élastomères

L'appui élastomère est constitué de plusieurs couches d'élastomère (caoutchouc ou néoprène) intercalées avec des plaques métalliques (frettes), ces couches sont illustrées dans la figure 2.4. Ce genre de système a un faible amortissement qui est de l'ordre de 2% ce qui induit un mouvement des structures de basculement, pour remédier à cet inconvénient on augmente l'amortissement des isolateurs de base soit par le traitement de l'élastomère en ajoutant du carbone, certaines types d'huile et de résine ce qui donne un amortissement de 10 à 20% ou bien on ajoute un roulement de plomb.

Ces derniers sont les plus courants. Ils permettent une flexibilité horizontale et ainsi un déplacement de la superstructure en bloc dans le sens contraire au déplacement du sol. De ce fait ils réduisent considérablement le déplacement relatif des étages.

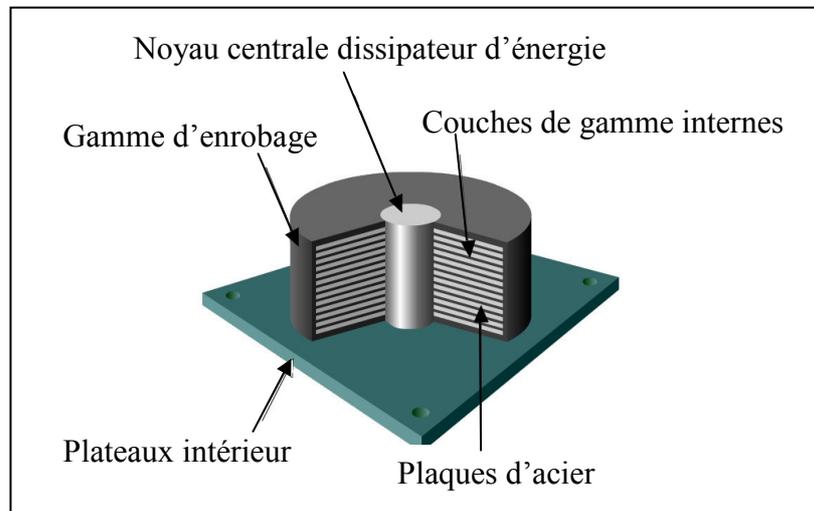


Figure 2.4. Isolateurs de bases à déformations [37].

b) Isolation à base de glissement

Ce système permet de diminuer les forces horizontales [68], et permet aussi le découplage des mouvements de la superstructure de ceux des éléments de fondation au moyen d'interface de glissement (figure 2.5.). De plus, l'interface de glissement permet de dissiper l'énergie sismique par friction [69].

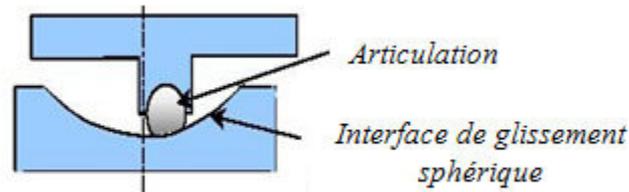


Figure 2.5. Schémas de l'isolateur de type pendule à friction.

2.2.2 Système de dissipation d'énergie passif

a) Contrôle par amortisseurs visqueux ou hystérétiques

Le principe de ce système est de répartir ses amortisseurs à différents niveaux de la structure. Dans cette section on cite deux types différents d'amortissement, qui sont les plus couramment utilisés [66] :

Les amortisseurs visqueux tels les amortisseurs à bain d'huile d'un véhicule. Le plus souvent ils sont de forme cylindriques, ou de type rectangulaires, ils renferment de l'huile ou un autre fluide à haute viscosité afin d'amortir les mouvements relatifs des étages (figure 2.6.).

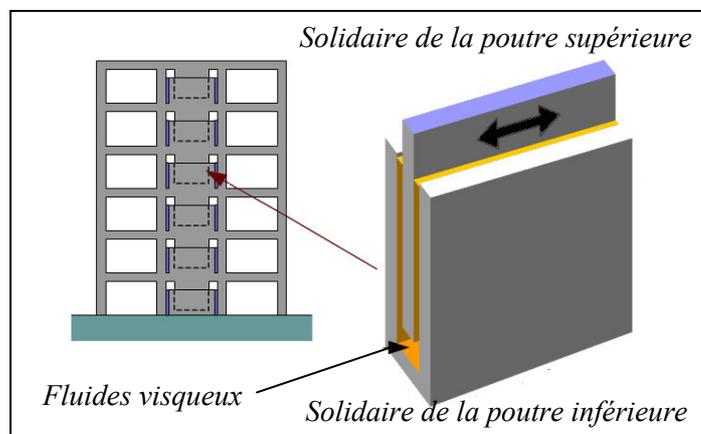


Figure 2.6. Amortisseurs visqueux [66].

Les amortisseurs hystérétiques, ce type d'amortisseurs possède des aciers avec des qualités plastiques spéciaux présentant des seuils élastiques très bas suivis de très larges zones de plasticité. La figure 2.7 illustre la forme et la position de ce type d'amortisseurs dans la structure.

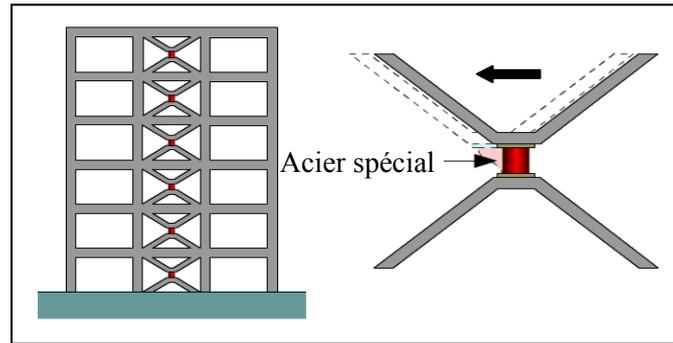


Figure 2.7. Amortisseurs hystérétique [66].

b) Contrôle par amortisseurs à friction

Ces amortisseurs à friction utilisent le phénomène physique du frottement, pour fournir la résistance. Sous l'effet sismique, les éléments composants de ce type de système vont glisser les uns par rapport aux autres, ce qui résulte des forces de frottement dans le sens inverse du mouvement. Il existe de très nombreux types d'amortisseurs à friction. La figure 2.8 est un exemple d'amortisseur à friction.

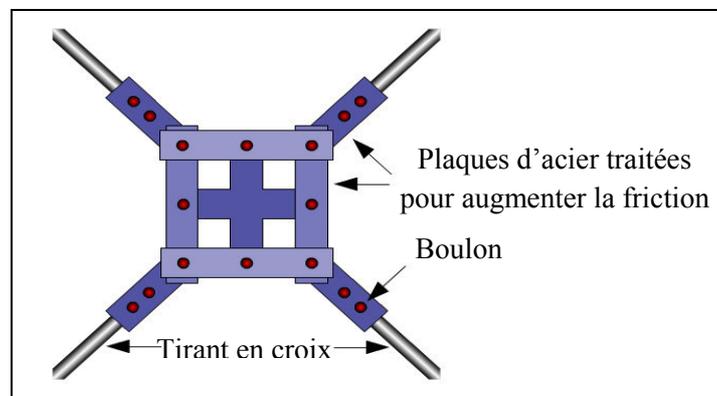


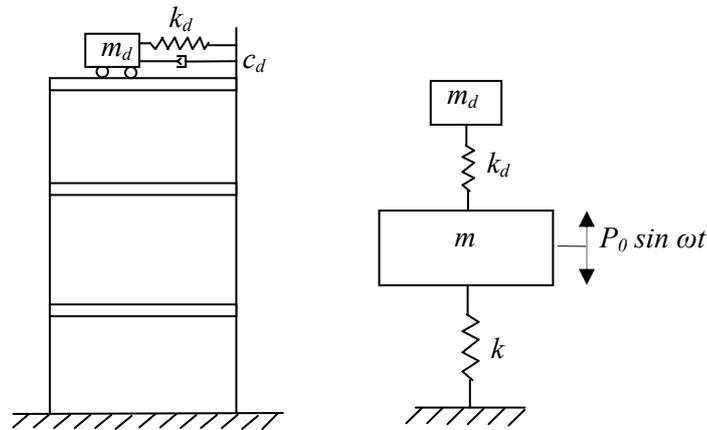
Figure 2.8. Amortisseur à friction [66].

2.2.3 Système d'absorption d'énergie

a) Contrôle passif par masse libre TMD

Un TMD est un dispositif constitué d'une masse, un ressort et un amortisseur qui sera attaché à une structure afin de réduire sa réponse dynamique. La fréquence de l'amortisseur est réglée sur une fréquence particulière structurelle afin que lorsque cette fréquence est excitée, l'amortisseur résonnera en opposition de phase avec le mouvement structurel. L'énergie est

dissipée par la force d'inertie de l'amortisseur agissant sur la structure. Le mécanisme de base d'un TMD est un absorbeur de vibration dynamique, comme indiqué dans la Figure 2.9.b.



a) Installation du TMD sur une structure b) Le mécanisme de TMD.

Figure 2.9. Schéma du TMD sur la structure [7].

L'avantage d'utiliser TMD est que contrairement à l'usage d'amortisseurs, Il permet tout simplement de diminuer le déplacement de la structure.

La performance d'un amortisseur à masse accordée est très liée au réglage de leurs paramètres. Cependant, une déviation légère dans la fréquence du réglage de sa valeur optimale peut mener à une détérioration de la performance du contrôle. En particulier, l'efficacité du TMD varie beaucoup lorsque la structure évolue ainsi que le type de chargement [37].

La conception des TMD peut être divisée en deux groupes: verticalement et horizontalement. La demande dépend de la forme du mode inquiétant ainsi que la position et la direction de la TMD afin de réduire ces vibrations [40].

Les systèmes travaillant verticalement sont généralement pris en charge par des ressorts hélicoïdaux en acier. La fréquence dépend simplement de la masse et la raideur du ressort. Les amortisseurs visqueux sont utilisés pour diffuser l'ensemble des fréquences de fonctionnement. Un exemple typique d'un tel système est illustré à la figure 2.10 (a, b) Le système de ressort peut également être conçu comme un système de suspension afin que les ressorts soient chargés en tension. L'application également combinée avec une tension et des ressorts de compression sont possibles [40].

Les TMD travaillant verticalement sont essentiellement disposés dans des structures à orientation horizontale comme les ponts ou les planchers. Ils peuvent être utilisés pour contrôler les modes de flexion de la structure. La disposition est également possible de limiter les modes de torsion surtout quand ils sont disposés par paires.

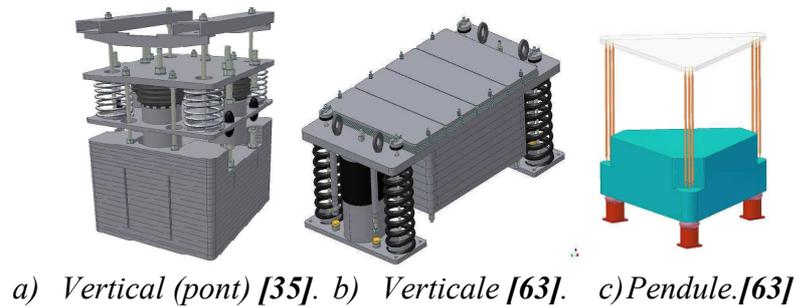


Figure 2.10. Schéma des types de TMD.

b) Contrôle passif par liquide libre TLD

Un TLD est un absorbeur de vibration dynamique qui utilise le mouvement d'un liquide (généralement l'eau) peu profond dans un conteneur partiellement rempli pour dissiper l'énergie de vibration, voir figure 2.11. La configuration du TLD est aussi conçue pour avoir une fréquence près de la fréquence fondamentale des structures. La fréquence du liquide est déterminée par sa profondeur. Quand le TLD est enthousiasmé, les boues intérieures liquides et l'énergie est dissipée de l'action visqueuse et de la casse de vague. Pour augmenter la dissipation d'énergie du liquide pataugeant, les dispositifs amortissant flux comme des écrans ou des postes dans le conteneur sont exigés [8].

Leurs avantages, comme un faible cout, un seuil de déclenchement quasi nul, une facilite de réglage de la fréquence propre et une installation facile sur des structures existantes, sont à l'origine d'un intérêt croissant pour ces dispositifs. Cependant, le mouvement du fluide peut être fortement non linéaire, car les vagues peuvent se briser en cas de vibration de forte amplitude [9].

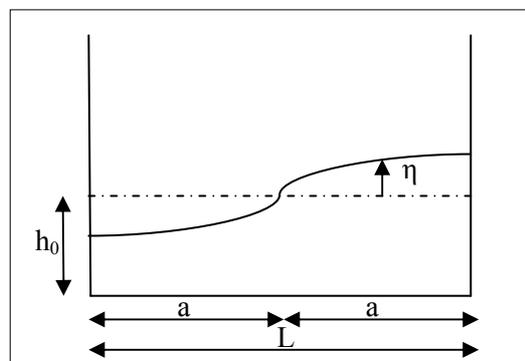


Figure 2.11. Schéma d'un amortisseur TLD.

c) Amortisseurs dynamiques à fluides accordés à colonne TLCD

Un amortisseur dynamique à fluide accordé à colonne (TLCD) est composé d'un tube en U, comme schématisé dans la figure 2.12, rempli de liquide (habituellement de l'eau), dont les propriétés sont accordées de telle sorte que les forces exercées à la base du dispositif, provoquées par le mouvement du liquide, contrebalancent le mouvement horizontal de son support. Ce principe est donc identique à celui d'un TMD [9]. Le réservoir en U est configuré pour avoir la fréquence naturelle qui correspond d'une façon optimale à une ou plusieurs fréquences naturelles de la structure. La fréquence naturelle du réservoir est déterminée par sa longueur effective et ceci est rapproché de la géométrie du réservoir et particulièrement à la proportion des zones à travers la section des colonnes verticales et le conduit de croisement [8]. Cependant, il présente plusieurs avantages par rapport à d'autres types de dispositifs d'amortissement, comme une simplicité d'installation et de construction, et des coûts de maintenance pratiquement nuls [9].

L'amortissement optimum du TLCD devrait normalement être identique à celui du TMD. Le TLCD présente un amortissement intrinsèque dû à la turbulence du fluide et, en insérant une valve de contrôle ou une plaque munie d'un orifice dans le tube horizontal, on peut améliorer encore l'amortissement du TLCD. Cependant, il n'existe aucune littérature spécifique donnant des informations sur la quantification de l'amortissement des TLCD, cette valeur doit donc toujours être obtenue par des essais effectués sur des prototypes de TLCD [9]. TLCD seul est capable de fournir l'amortissement le long d'un axe de construction seul [8].

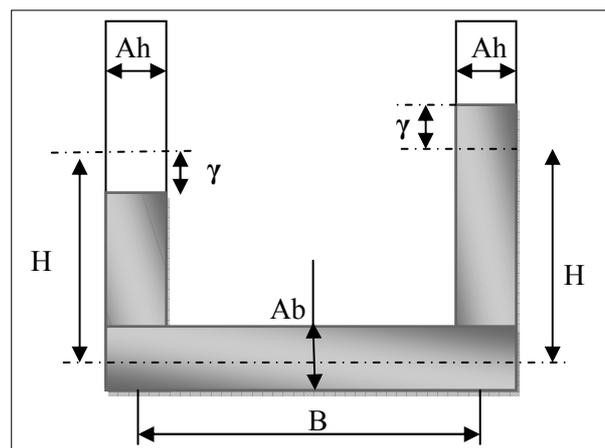


Figure 2.12. Schéma d'un amortisseur TLCD.

Un exemple d'application de système TLCDS dans le Centre Mural à Vancouver, au Canada est indiqué dans la figure 2.13:



Figure 2.13. Le Centre Mural à Vancouver.

2.3 Contrôle actif

Un système de contrôle actif est un système beaucoup plus complexe que le système de contrôle passif. L'alimentation externe est utilisée aux vérins situés dans la structure afin d'appliquer les forces qui peuvent mettre dedans ou sortir l'énergie du système. Pour que les déclencheurs appliquent correctement les forces désirées, des capteurs doivent être placés dans la structure afin de mesurer l'effet structural. Ces capteurs retransmettent l'information de réponse à un ordinateur central qui emploie alors cette information pour calculer les forces désirées de déclencheur. L'avantage d'un système de contrôle actif est que le système atteint un excellent résultat de contrôle. Cependant, il y a des inconvénients. C'est un système cher à concevoir et cher à utiliser en raison de son besoin important en puissance. En outre, il tend à prendre plus d'espace que les dispositifs de contrôle passifs [34].

La figure 2.14 illustre la configuration de base d'un système de contrôle actif [7] :

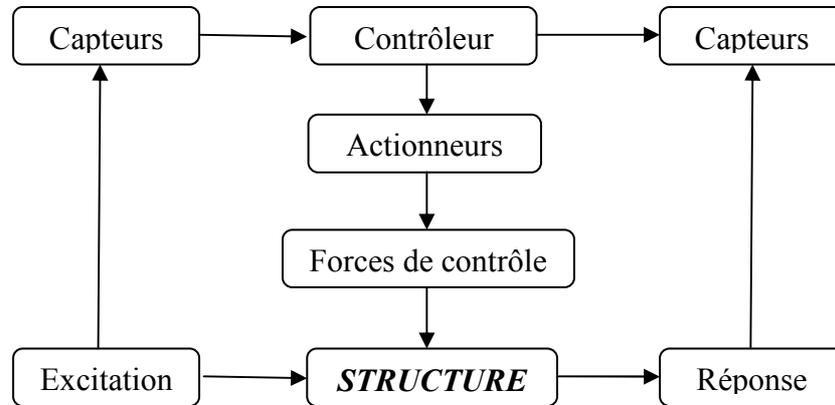


Figure 2.14. Diagramme schématisé d'un système de contrôle actif.

2.3.1 Le système AMD

Les composants du système AMD sont les suivants [10]:

- i) Des capteurs installés à plusieurs endroits (figure 2.15), notamment : le niveau du sol, mi-hauteur, et le niveau du toit pour détecter les mouvements sismiques et des tremblements au niveau du sol et dans le bâtiment.
- ii) L'ordinateur de contrôle qui analyse chaque signal et émet un ordre de conduire. L'algorithme de contrôle du système est de type boucle fermée où la force de contrôle actif est déterminée grâce à la rétroaction de la vitesse linéaire de la réponse de la structure.
- iii) Actionneurs qui exécutent l'ordre de commande et d'entraînement des masses. La source de pression hydraulique pour l'actionneur est constituée de deux pompes et un accumulateur. Une pompe est faible en comparaison à l'autre; sa fonction est de fournir un niveau minimum de pression en continu. La plus grande pompe est activée lorsque le séisme se produit.
- iv) Deux masses ajoutées tirées par les actionneurs. Ces masses sont suspendues par des câbles d'acier afin de réduire les frottements.

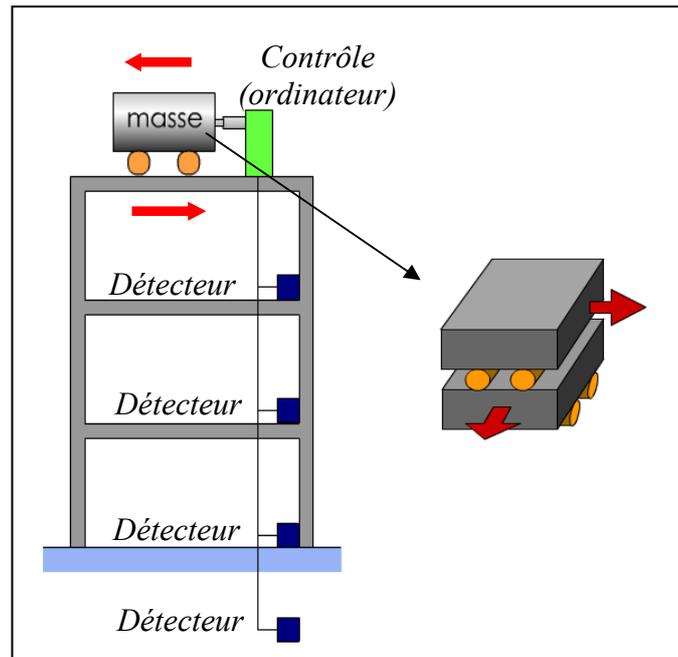


Figure 2.15. Une structure avec un système AMD.

2.3.2 Le système Tendon actif

Le système de contrôle de type tendon actif est très similaire à un AMD seulement que cela fonctionne au bas de la structure.

Un tendon actif est un système constitué d'un ensemble de câbles de précontrainte contrôlé par un dispositif électro-hydraulique. Ce type de systèmes est installé entre deux étages d'une structure de type bâtiment. Le cylindre du vérin est fixé au-dessous de l'étage, tel que l'extrémité du tendon est relié à l'étage supérieur et l'autre extrémité au piston de l'actionneur, comme monté dans la figure suivante.

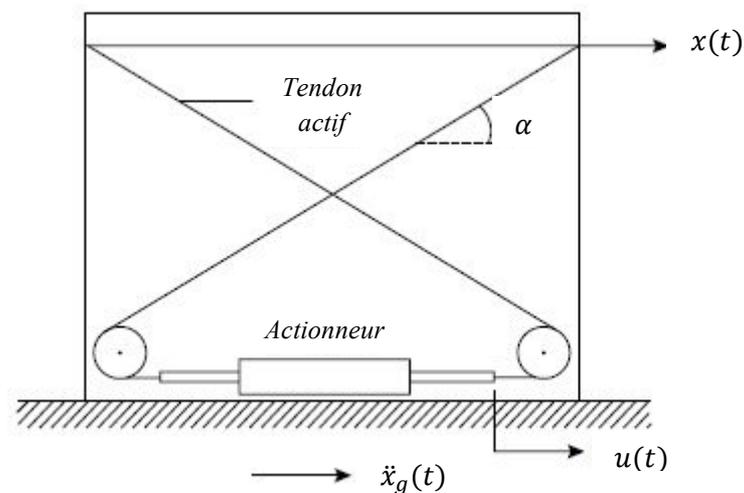


Figure 2.16. Configuration d'un tendon actif [7].

Les tendons actifs peuvent fonctionner en deux modes du temps continu et pulsé, ainsi peuvent accueillir à la fois le temps et les algorithmes de contrôle. L'autre avantage de ce système est qu'il n'exige pas une modification ou un ajout des éléments dans la structure contrôlée [7].

2.4 Contrôle semi actif

Dans ce système de contrôle, des mécanismes sont employés pour commander ou aider un dispositif de contrôle passif. L'avantage inhérent d'un dispositif de contrôle semi actif est que le mécanisme utilisé n'exige pas un grand nombre d'alimentation externe. Beaucoup de dispositifs semi actifs peuvent être actionnés par des batteries les protégeant contre la perte de puissance soudaine pendant les tremblements de terre. En outre, les dispositifs de contrôle semi actifs sont moins complexes mécaniquement que les dispositifs actifs. Les systèmes semi actifs sont plus agressifs que les systèmes passifs et obtiennent habituellement des résultats de contrôle près de celui d'un système de contrôle actif [34].

La figure 2.17 illustre la configuration de base d'un système de contrôle semi-actif :

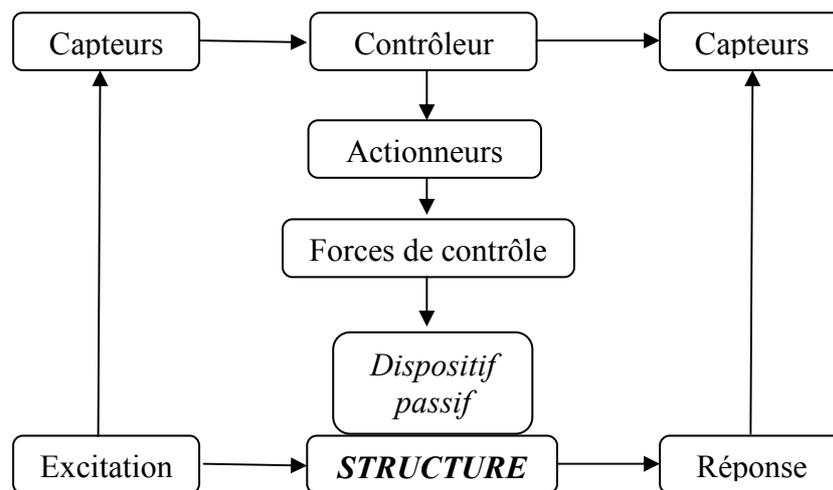


Figure 2.17. Diagramme schématisé d'un système de contrôle semi-actif [7].

La stratégie de contrôle semi actif est semblable à la stratégie de contrôle actif [46]. Seulement ici, le système de contrôle n'ajoute pas l'énergie à la structure.

Les dispositifs semi actifs exigent beaucoup moins d'énergie que les dispositifs actifs ; et l'énergie peut souvent être stockée localement, dans une batterie, de ce fait rendant le non tributaire du type d'unité semi actif de n'importe quel bloc d'alimentation externe. Un autre thème critique avec le contrôle actif est la robustesse de stabilité en ce qui concerne l'échec de capteur ; ce problème est particulièrement difficile quand des contrôleurs centralisés sont employés [43].

La schématisation inertielle du système actif est présentée dans la figure 2.18 suivante :

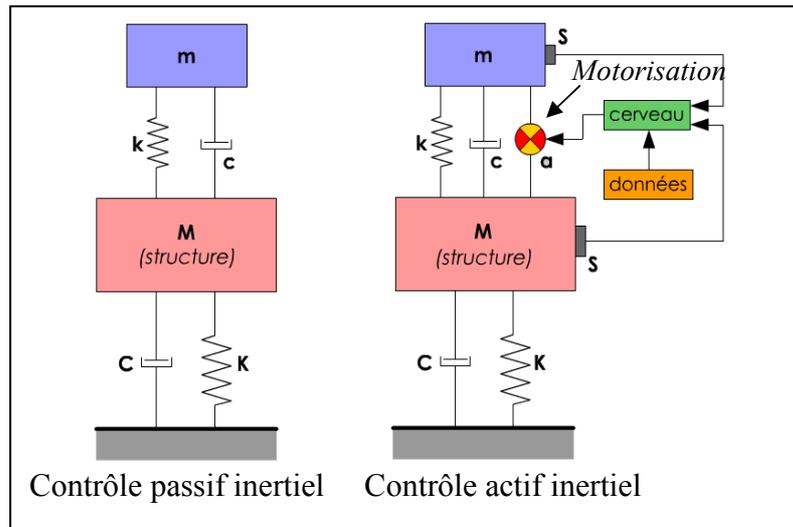


Figure 2.18. Schématisation inertielle du contrôle passif et actif [66].

La schématisation du système semi-actif se ferait alors ainsi dans la figure 2.19 :

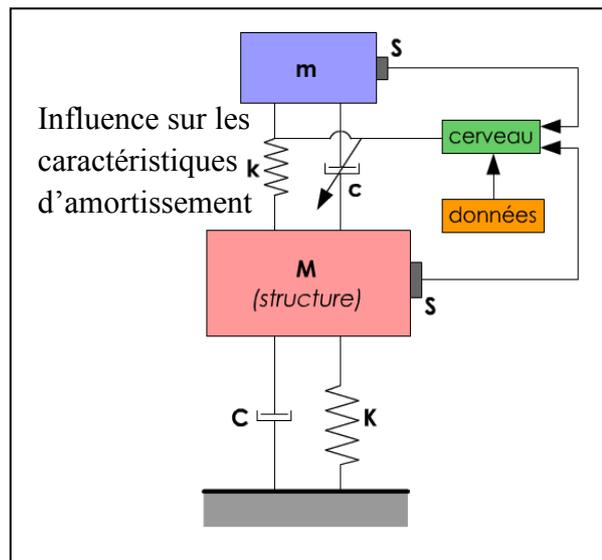


Figure 2.19. Contrôle semi-actif inertiel [66].

Les systèmes semi-actifs sont multiples et peuvent équiper des structures de tout type. Ils sont également utilisés pour répondre à d'autres besoins que celui du contrôle de la réponse dans le domaine de l'architecture parasismique [66].

2.4.1 Amortisseurs à fluide magnéto-rhéologiques

Les amortisseurs magnéto-rhéologiques (MR) sont des composants non-linéaires dissipatifs, utilisés dans la commande de suspension semi-active, où le coefficient d'amortissement varie

selon le courant électrique [2]. La dureté de ce type d'amortisseurs dépend de la viscosité du fluide, qui est contrôlée par le champ magnétique [5].

a) Fluides magnéto-rhéologiques

Un fluide Magnéto-rhéologique est une huile silicone contenant des particules ferromagnétiques de taille micro-métrique formant des structures agrégées sous l'action d'un champ magnétique (figure 2.20) [28].

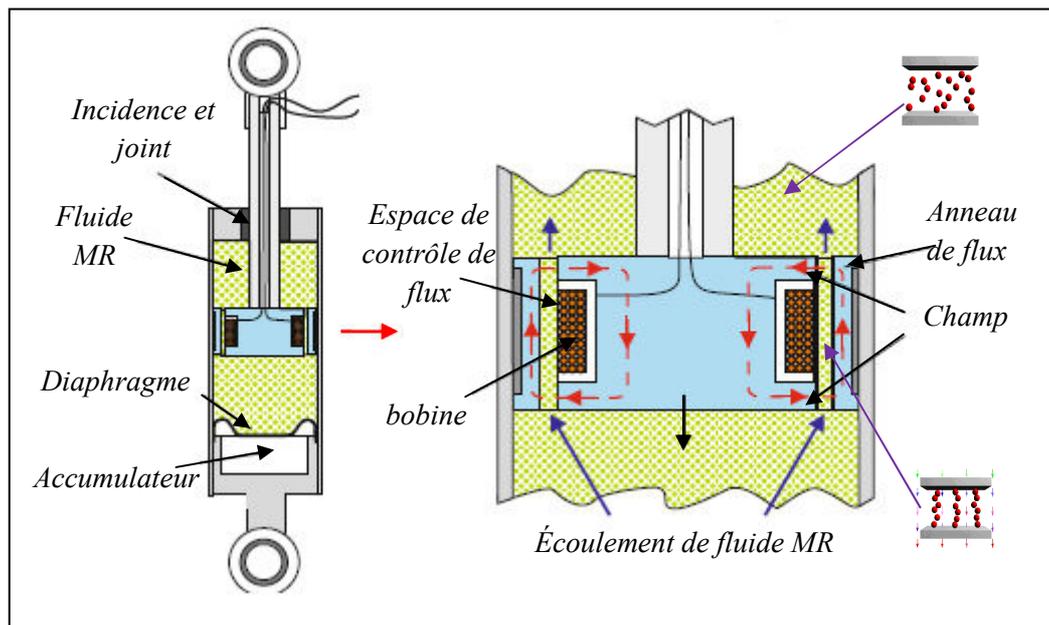


Figure 2.20. Schéma d'un amortisseur à fluide MR adapté de Carlson en 2007[43].

2.5 Contrôle hybride

Les stratégies de contrôle hybrides ont été étudiées par de nombreux chercheurs pour exploiter leur potentiel pour accroître la fiabilité et l'efficacité globale de la structure contrôlée activement [24]. Ces systèmes de contrôle hybrides ont reçu beaucoup d'attention depuis les années 1990 [7].

Un système de contrôle hybride se réfère généralement à un système de contrôle passif et actif combinés, ce qui permet d'augmenter la fiabilité et l'efficacité globale de la structure contrôlée potentiellement [52]. Donc, ce système remporte les avantages des deux techniques. Ce qui rend ce système capable de réduire de moitié l'amplitude des mouvements des constructions [66].

2.5.1 Amortisseur à masse hybride

Un amortisseur de masse hybride (HMD) est un système proposé pour supprimer la réponse d'un grand bâtiment contre les vents forts et les charges sismiques modérées pour répondre à l'exigence sur le niveau de vibration pour le confort [38]. La figure 2.21 est un type d'un amortisseur à masse hybride utilisé pour le contrôle des bâtiments.

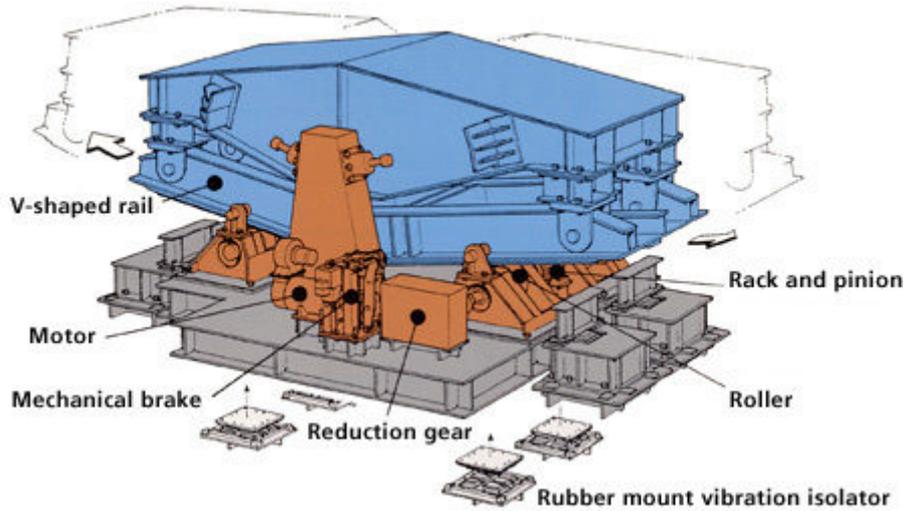


Figure 2.21. Un amortisseur à masse hybride [67].

Le HMD combine un TMD (*contrôle passif*) et un actionneur de contrôle actif, ou il ajoute un AMD à un TMD, comme le montre la figure 2.22 [7]. Un AMD est attaché à un lieu de TMD à la structure de telle sorte que sa masse est de 10 à 15% de celle du TMD. L'actionneur génère une force de commande, qui régule le TMD et augmente ainsi l'efficacité de l'appareil pour modifier les caractéristiques dynamiques de la structure [7].

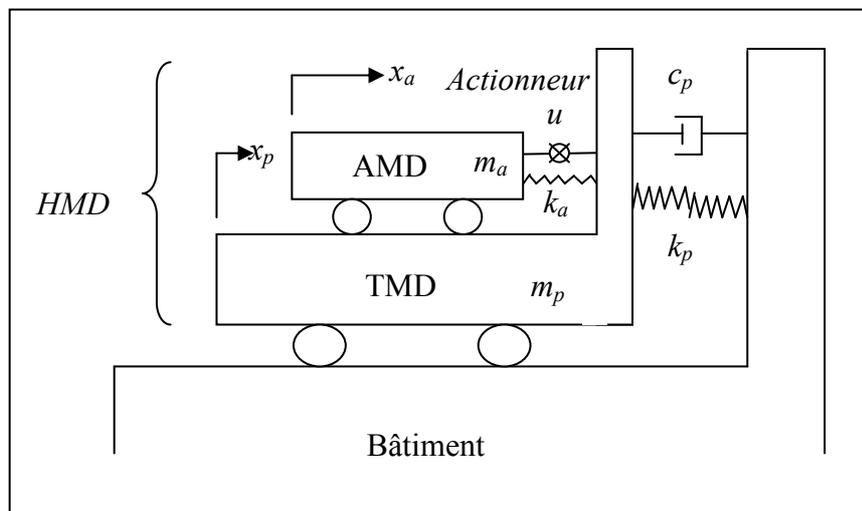


Figure 2.22. Schéma d'un amortisseur de masse hybride.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a décrit quatre types de systèmes de contrôle : passive, active, hybrides et semi-active. Chacun de ces systèmes a des caractéristiques spécifiques qui le rendent plus désirable ou plus efficace dans certains cas. Les systèmes passifs sont relativement peu coûteux à entretenir et ne nécessitent aucune puissance pour être efficace, mais ces systèmes ne peuvent pas être modifiés une fois installés. Les systèmes actifs s'appuient sur des algorithmes complexes aux vibrations de combat, mais ces systèmes nécessitent une immense source d'alimentation externe. Les systèmes hybrides et les systèmes semi-actifs combinent les systèmes passifs et actifs pour maximiser l'effet d'amortissement, mais ils sont plus chers et sont encore l'objet de recherches.

Dans la suite on utilisera dans les applications numérique un système de contrôle actif de type tendon actif, par ce que notre objectif est d'étudier l'importance du contrôle et non pas le choix du contrôle.

CHAPITRE 03

Effet de l'interaction sol-structure

3.1 Introduction

Les structures en génie civil présentent un certain degré d'interaction ou de couplage avec les milieux environnants. Ce couplage peut être dû aux effets thermiques, inertiels, cinématiques, ou autres. Ces structures interagissent avec le sol à travers leurs fondations, et le comportement des structures enterrées est conditionné par le couplage avec le rocher ou les couches de sol avoisinantes. La flexibilité du sol d'assise modifie le comportement dynamique de la structure supportée qui, en retour engendre des forces d'interaction qui perturbent le mouvement du sol. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction sol-structure (ISS).

Dans le domaine du génie parasismique, ce phénomène est un phénomène très important à considérer. D'après le tremblement de terre de **1971** à San Fernando et les conséquences catastrophiques de plusieurs tremblements de terre dans différentes régions du monde, les ingénieurs ont sérieusement pris en considération les effets de l'interaction sol-structure pour une meilleure compréhension du comportement sismique des structures en tenant compte de l'effet de l'ISS [58].

3.2 Etat de l'art de l'ISS

L'interaction sol-structure est souvent négligée par les ingénieurs lors de l'analyse et du design d'une structure, malgré que, ce phénomène a un grand effet sur le comportement des structures, qui dépend des caractéristiques du sol et de la structure elle-même. Pour cette raison, plusieurs recherches ont été faites dans ce domaine. On citera brièvement quelques unes :

En 1996, **Steven L Kramer** [54] présente dans "*Geotechnical EQ Engineering*" les effets du phénomène d'interaction sol structure, et donne différentes méthodes pour prendre en compte l'effet d'ISS. Le problème d'ISS est traité en 2000 dans le contexte des structures multi supports, comme le pont, par **Clough & Penzien** dans leur travaux "*Dynamics of structures*".

Une modélisation est faite en éléments finis (2D) de l'interaction dynamique sol-structure d'un bâtiment par la méthode de sous structure, en 2000 par **M. Kutanis & M. Elmas** [32]. Plusieurs comparaisons ont été menées :

- i) *Une comparaison entre trois types d'analyses : une analyse linéaire et non linéaire de l'ISS dynamique comparés avec le cas d'encastrement d'une même structure.*
- ii) *Une comparaison des analyses faites pour trois enregistrements sismiques ayants trois différentes valeurs de PGA (0,15 g, 0,3 g et 0,45 g) choisis pour solliciter le modèle.*
- iii) *Enfin, pour montrer l'influence des caractéristiques du sol sur l'effet de l'ISS, trois types de sol ont été choisis caractérisés par des vitesses de propagation des ondes de cisaillement de 200s/300 et 500s.*

En 2004, *John P. Wolf & Andrew J. Deeks* [29] ont développé la théorie des cônes (poteaux-poutres coniques), qui l'ont appliqué aux analyses vibratoires de fondation. Ce travail montre l'influence des caractéristiques du sol sur le déplacement de la structure.

En 2004 toujours, *H. Shakibet et A. Fuladgar* [55] ont formulé une approche dans le domaine temporelle pour l'analyse linéaire en 3D de l'interaction sol structure d'un bâtiment de forme anti symétrique, pour l'évaluation de la réponse sismique de la structure. Le contact entre la fondation et le sol est modélisé par des éléments d'interface plans linéaires d'épaisseur nulle.

En 2005, *M. Oudjeneet al* [42] ont démontré que la modification de l'action sismique des hautes fréquences n'est pas prise en compte par la forme des différents spectres de réponse ainsi proposée dans la gamme des hautes fréquences. Ensuite, ils ont discuté l'état actuel de ces spectres de calcul et ont suggéré que l'allongement de la période fondamentale n'implique pas systématiquement la diminution de l'accélération spectrale.

3.3 Phénomène d'interaction sol structure

Dans le calcul sismique des structures, l'excitation est définie par un ou plusieurs enregistrements d'accélération souvent mesurées à la surface du sol en l'absence de toute construction. Ces enregistrements donnent les accélérogrammes en champs libre. En présence d'un bâtiment ou d'une quelconque autre construction, les mouvements au voisinage des fondations peuvent différer de ceux existant en champ libre. En effet, les forces au contact entre la structure et sa fondation perturbent le mouvement du sol, et le moment d'encastrement à la base provoque la rotation de celle-ci. Ce phénomène est désigné par "Interaction Sol - Structure" ou "ISS" [53].

3.4 Les différentes méthodes pour prendre en compte l'ISS

Il existe différentes méthodes pour prendre en compte l'effet de l'ISS. Nous allons les présenter brièvement dans cette section.

3.4.1 La méthode globale (*Méthode Directe*)

La méthode globale consiste à résoudre directement l'équation de la dynamique régissant le comportement du système. Un problème important afférent à cette méthode réside dans la mise en œuvre du chargement sismique à appliquer au modèle numérique. On distingue trois variantes telles que rapportées dans les sections suivantes [53] :

a) *Méthode à déconvolution du mouvement sismique*

La résolution du problème d'Interaction Sol Structure par cette méthode passe par deux étapes telles que schématisées sur la figure 3.1 :

1- En première étape le mouvement sismique de dimensionnement est connu et donné à la surface du sol, ce qui permet d'obtenir l'accélération à la base du modèle numérique en champ libre. Cette base est choisie à une profondeur suffisante pour que la présence de la structure en surface n'affecte pas le mouvement à la base. Cette étape est connue sous le nom de déconvolution du mouvement sismique qui se ramène au problème de résolution de la propagation d'onde dans le sol.

2- Ensuite le mouvement déconvolué est imposé uniformément à la base du système sol structure. Enfin, le système d'équation (3.1) de mouvements obtenu est résolu pour obtenir la réponse dynamique.

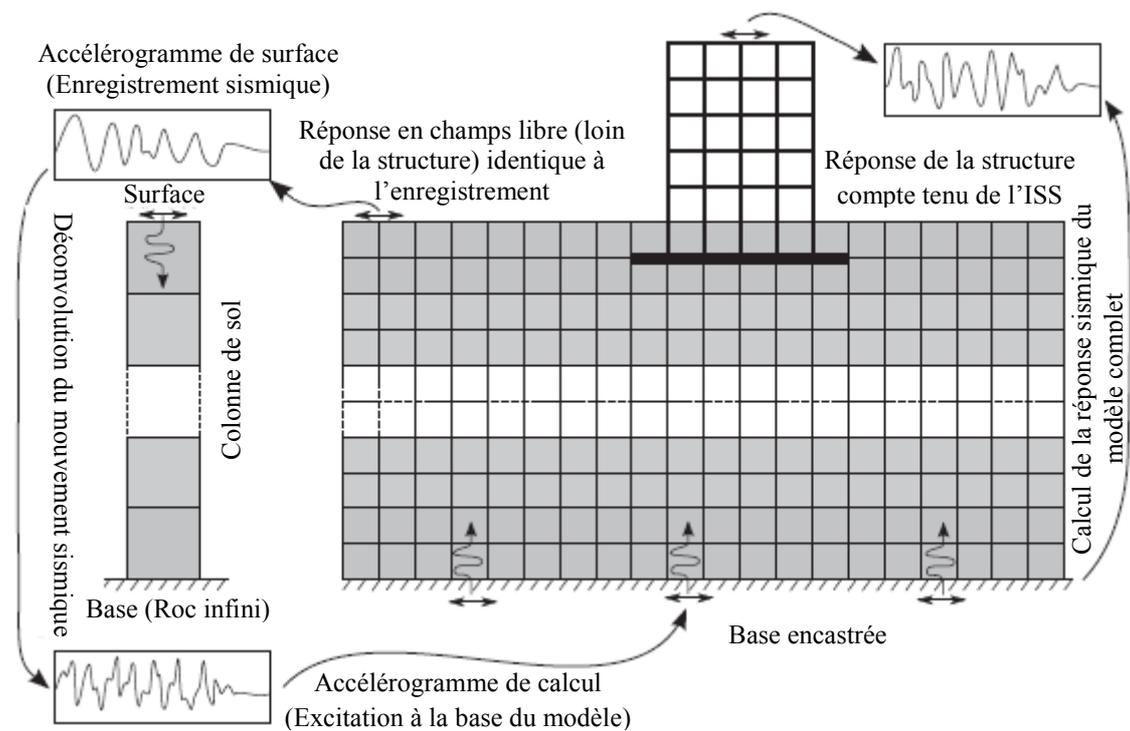


Figure 3.1. Modélisation de l'ISS par la méthode globale [53].

Le système matriciel découlant de la discrétisation du problème complet s'écrit :

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (3.1)$$

Où :

M , C et K : sont les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité du système complet.

u : représente le vecteur des déplacements des nœuds du modèle par rapport à la base mobile.

$F(t)$: C'est le vecteur des forces d'excitation sismique agissant à la base du modèle. Si les accélérations sismiques $\ddot{u}_g(t)$ sont connues en profondeur, on a :

$$F(t) = -MI\ddot{u}_g(t) \quad (3.2)$$

Avec :

M : est la masse totale,

I : est le vecteur de couplage dynamique dont les composantes correspondent aux degrés de liberté de même direction que les accélérations sismiques ; donc le vecteur I contenant des 1 pour les directions soumises à l'accélération $\ddot{u}_g(t)$, et les autres sont nulles.

b) Méthode de déplacement uniforme ajouté

Dans cette méthode, le vecteur de déplacement est décomposé en deux parties, comme suit [53] :

$$\begin{Bmatrix} U_b \\ U_f \\ U_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_b \\ u_f \\ u_s \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} V_b \\ V_f \\ V_s \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

Tel que : u est le vecteur de déplacement ou vecteur d'interaction, et V est le vecteur des déplacements du sol en champ libre. L'indice « b » pour la structure, « f » désigne la fondation ou les nœuds communs à la structure et au sol, et l'indice « s » pour le sol.

Dans ce cas, l'équation du mouvement (3.1) sera représentée en sous matrices en tenant compte des composants du système : structure seule, fondation et sol.

On a alors :

$$\begin{bmatrix} M_{bb} & M_{bf} & 0 \\ M_{fb} & M_{ff} & M_{fs} \\ 0 & M_{sf} & M_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_f \\ \ddot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{bb} & C_{bf} & 0 \\ C_{fb} & C_{ff} & C_{fs} \\ 0 & C_{sf} & C_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_f \\ \dot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{bb} & K_{bf} & 0 \\ K_{fb} & K_{ff} & K_{fs} \\ 0 & K_{sf} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_f \\ u_s \end{Bmatrix} = R \quad (3.4)$$

Le vecteur R représente la différence entre les forces sismiques agissant à la base du modèle et les forces dynamiques dues au mouvement de champs libre :

$$R = F - M\ddot{V} - C\dot{V} - KV \quad (3.5)$$

En champ libre, l'équation de mouvement qui donne l'équilibre dynamique du sol sans la présence de la structure est :

$$\begin{Bmatrix} M_{ff}^{(S)} & M_{fs} \\ M_{sf} & M_{ss} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_f \\ \ddot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} C_{ff}^{(S)} & C_{fs} \\ C_{sf} & C_{ss} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_f \\ \dot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} K_{ff}^{(S)} & K_{fs} \\ K_{sf} & K_{ss} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_f \\ u_s \end{Bmatrix} = F \quad (3.6)$$

Où l'exposant (S) désigne la partie des matrices associée aux nœuds communs et dont les composantes viennent uniquement de l'assemblage des éléments du sol.

La substitution de l'équation (3.6) dans l'équation (3.5) réduit le vecteur R à :

$$R = - \begin{bmatrix} M_{bb} & M_{bf} & 0 \\ M_{fb} & M_{ff}^{(b)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{V}_b \\ \ddot{V}_f \\ \ddot{V}_S \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{bb} & C_{bf} & 0 \\ C_{fb} & C_{ff} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{V}_b \\ \dot{V}_f \\ \dot{V}_S \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{bb} & K_{bf} & 0 \\ K_{fb} & K_{ff} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_b \\ V_f \\ V_S \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

Où l'exposant (b) désigne les matrices venant des contributions des éléments finis de la structure. Le vecteur R n'intervient que les matrices de la structure et la fondation, il est en fonction des déplacements en champ libre.

Lorsque les forces liées à l'amortissement et les forces d'inertie sont les forces prédominantes c'est le cas d'interaction inertielle, par contre si les forces liées à la raideur sont les forces prédominantes on est dans le cas d'interaction cinématique.

Si le mouvement en champ libre est uniforme, le vecteur de déplacement de fondation V_f devient constant, ce qui réduit le vecteur R à :

$$R = - \begin{bmatrix} M_{bb} & M_{bf} & 0 \\ M_{fb} & M_{ff}^{(b)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{V}_b \\ \ddot{V}_f \\ \ddot{V}_S \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

Dans le cas général, le déplacement n'est pas uniforme, l'équation (3.3) devient :

$$\begin{Bmatrix} U_b \\ U_f \\ U_S \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_b \\ u_f \\ u_S \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ V_f \\ V_S \end{Bmatrix} \quad (3.9)$$

Tel que u_b est un déplacement absolu, il comprend à la fois le déplacement en champs libre et celui dû à l'interaction.

Le vecteur chargement R s'obtient par soustraction de la réponse du sol de celle du système, il devient :

$$R = - \begin{bmatrix} K_{bb} & K_{bf} & 0 \\ K_{fb} & K_{ff}^{(b)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ V_C \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} M_{bb} & M_{bf} & 0 \\ M_{fb} & M_{ff}^{(b)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ \dot{V}_C \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

Si on néglige l'inertie des éléments de contact appartenant à la structure ou en connectant celle -ci à la fondation avec des ressorts sans masse, alors le vecteur de chargement se réduit encore à :

$$R = - \begin{bmatrix} K_{bf} \\ K_{ff}^{(b)} \\ 0 \end{bmatrix} \{V_C\} \quad (3.11)$$

D'après l'équation (3.3) on conclut que les forces à appliquer au modèle sont dues uniquement à la rigidité des éléments de contact à coté de la structure.

c) Méthode de réduction de domaine

Cette méthode est récemment développée par *Bielak* et al [53], et elle est utilisée pour l'analyse sismique.

Méthode de réduction de domaine → Réduire le domaine du sol à grande dimension à un domaine de petit dimension ;

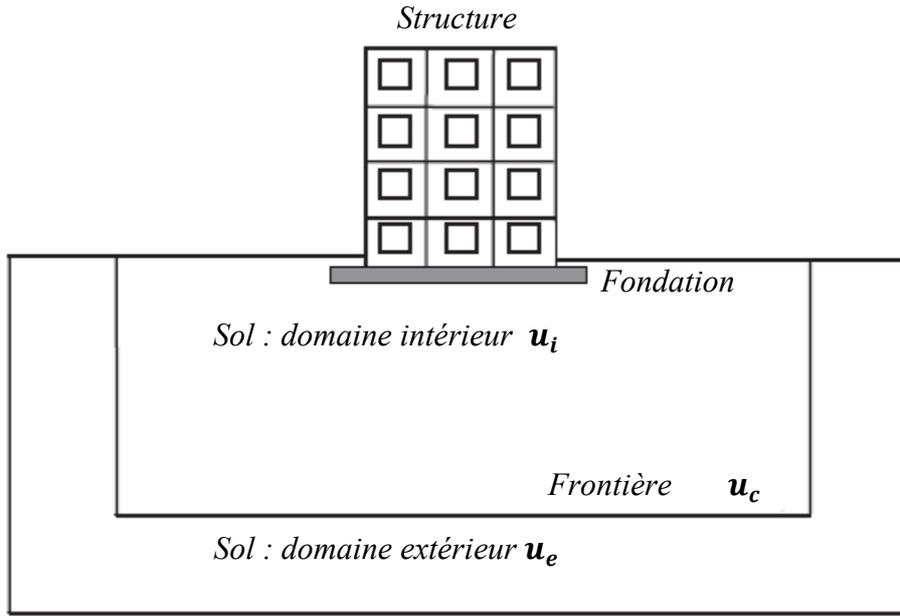


Figure 3.2. Méthode de réduction de domaine.

D'après la figure 3.2, on constate que le domaine complet est divisé en deux parties : une partie constituée de la structure et une partie du sol avoisinant la structure désignée par « *i* », et l'autre partie concerne le sol éloigné par rapport à la structure désignée par « *e* », La frontière fictive entre les deux parties est désignée par un contour noté par « *c* ».

L'équation d'équilibre dynamique du système complet est :

$$\begin{bmatrix} M_{ii} & M_{ic} & 0 \\ M_{ci} & M_{cc} & M_{ce} \\ 0 & M_{ec} & M_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ii} & C_{ic} & 0 \\ C_{ci} & C_{cc} & C_{ce} \\ 0 & C_{ec} & C_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_i \\ \dot{u}_b \\ \dot{u}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ic} & 0 \\ K_{ci} & K_{cc} & K_{ce} \\ 0 & K_{ec} & K_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \\ u_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_e \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

L'amortissement est négligé, donc l'équation (3.12) peut être réécrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} M_{ii} & M_{ic} & 0 \\ M_{ci} & M_{cc} & M_{ce} \\ 0 & M_{ec} & M_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ic} & 0 \\ K_{ci} & K_{cc} & K_{ce} \\ 0 & K_{ec} & K_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \\ u_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_e \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

Tel que :

M_{cc} , C_{cc} et K_{cc} : sont les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité des nœuds appartenant à la frontière du domaine extérieur respectivement.

u_e : est le déplacement total des points appartenant au domaine extérieur, avec :

$$u_e = V_e + w_e \quad (3.14)$$

Où : V_e est le déplacement relatif, et w_e est le déplacement résiduel.

En substituant (3.14) dans (3.13), on obtient après réarrangement du second membre :

$$\begin{bmatrix} M_{ii} & M_{ic} & 0 \\ M_{ci} & M_{cc} & M_{ce} \\ 0 & M_{ec} & M_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_c \\ \ddot{w}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ic} & 0 \\ K_{ci} & K_{cc} & K_{ce} \\ 0 & K_{ec} & K_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_c \\ w_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -M_{ce}\ddot{V}_e - K_{ce}V_e \\ P_e - M_{ee}\ddot{V}_e - K_{ee}V_e \end{Bmatrix} \quad (3.15)$$

La troisième équation du système (3.13) donne le vecteur P_e :

$$P_e = M_{ec}\ddot{V}_c + M_{ee}\ddot{V}_e + K_{ec}V_c + K_{ee}V_e \quad (3.16)$$

La substitution dans (3.15) donne le vecteur des forces fictives P_{eff} due à la partie extérieure du domaine et agissant sur la frontière « c » :

$$P_{eff} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -M_{ce}^{(e)}\ddot{V}_e - K_{ce}^{(e)}V_e \\ -M_{ec}^{(e)}\ddot{V}_c - K_{ce}^{(e)}V_c \end{Bmatrix} \quad (3.17)$$

Ce changement de variable permet d'appliquer le chargement sismique sous forme d'une force au lieu d'un déplacement imposé à la base du modèle, ce qui donne plus de flexibilité dans l'application des conditions aux limites. En effet, un chargement sous forme de déplacement imposé conduit en général à des conditions aux limites introduisant des réflexions d'onde alors qu'un chargement sous forme de forces imposées permet d'appliquer des frontières absorbantes [53].

3.4.2 Méthode de sous structure

Cette méthode s'appuie sur le principe de la superposition de deux sous-structures, une concerne la structure et l'autre concerne le sol à l'infini avec une excavation, tel que l'interface sol-structure est supposée être rigide, cette démarche est illustrée par la figure 3.3.

Les charges peuvent être appliquées à la structure, ou à l'intermédiaire du sol par l'excitation sismique qui se propage verticalement sous forme d'ondes, appliqués à l'interface sol-structure [29].

Le nœud au centre de l'interface sol-structure est désigné par $\mathbf{0}$, et les autres nœuds de la structure sont désignés par \mathbf{S} .

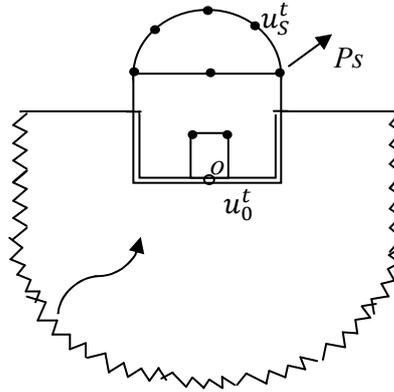


Figure 3.3. Les deux sous-structures : sol et structure rigide avec interface sol-structure [29].

L'équation de mouvement dans le domaine temporel exprime l'équilibre de système, ce qui donne:

$$[M]\{\ddot{u}^t(t)\} + [C]\{\dot{u}^t(t)\} + [K]\{u^t(t)\} = \{P(t)\} \quad (3.18)$$

Dans le domaine complexe on a :

$$\{u^t(t)\} = \{u^t(w)\} e^{iwt} \quad (3.19)$$

$$\{P(t)\} = \{P(w)\} e^{iwt} \quad (3.20)$$

L'équation (3.18) dans le domaine complexe devient :

$$\{P(w)\} = (-w^2[M] + iw[C] + [K])\{u^t(w)\} \quad (3.21)$$

On peut écrire l'équation (3.21) sous la forme :

$$\{P(w)\} = [S(w)]\{u^t(w)\} \quad (3.22)$$

La matrice de la rigidité dynamique $[S(w)]$ est :

$$[S(w)] = -w^2[M] + iw[C] + [K] \quad (3.23)$$

Où :

$[M]$, $[C]$ et $[K]$: sont les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité du système complet.

$\{u^t(w)\}$: représente le déplacement total.

$\{P(w)\}$: Le vecteur des amplitudes des charges agissant sur la structure.

L'équation (3.22) devient :

$$\{u^t(w)\} = [S(w)]^{-1}\{P(w)\} = [G(w)]\{P(w)\} \quad (3.24)$$

Tel que : $[G(w)]$ est la matrice de la flexibilité dynamique du système.

L'équation de mouvement (3.22) de la structure est formulée comme suit [29] :

$$\begin{bmatrix} [S_{SS}(w)] & [S_{S0}(w)] \\ [S_{0S}(w)] & [S_{00}^g(w)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^t(w)\} \\ \{u_0^t(w)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_S(w)\} \\ -\{P_0(w)\} \end{Bmatrix} \quad (3.25)$$

$\{u_s^t(w)\}$ et $\{P_S(w)\}$ concernent la structure.

$\{u_0^t(w)\}$ et $\{P_0(w)\}$ concernent l'interface sol-structure.

La sous structure du système sol non borné, avec une interface sol-structure rigide et sans masse est abordé, pour exprimer $\{P_0(w)\}$, ce système est illustré dans la figure 3.4 [29].

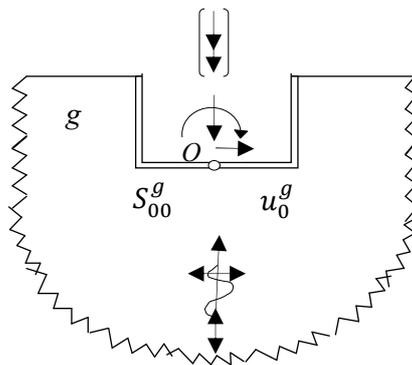
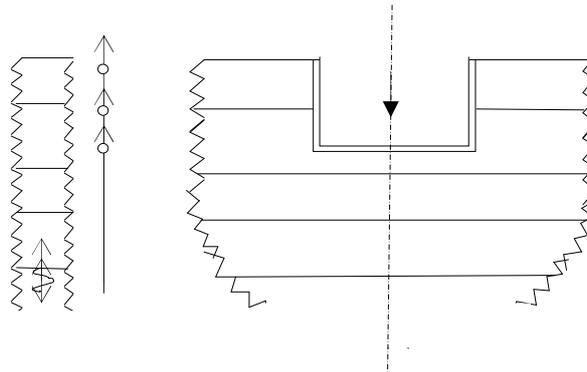


Figure3.4. Sous-structure : sol sans limite.

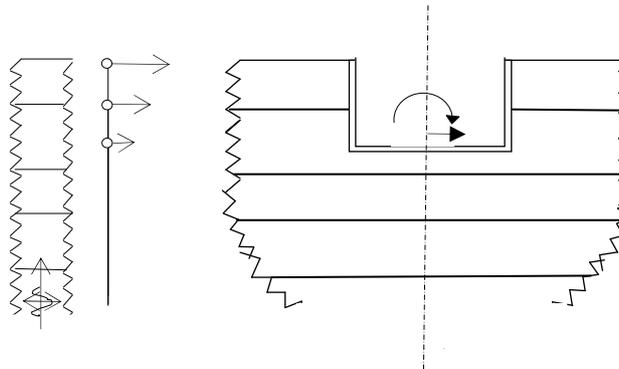
Tel que $[S_{00}^g(w)]$ désigne la matrice de la rigidité dynamique, et $\{u_0^g(w)\}$ les amplitudes de déplacement de la masse du système sol, causée par l'excitation sismique [29].

Pour que les ondes P se propagent verticalement, le déplacement en champ libre est également vertical, et le mouvement d'entrée efficace de la base

consiste en une composante verticale, ce qui pourrait mener un déplacement en champ libre dans la zone d'encastrement, illustré dans la figure 3.5.a. Au contraire pour les ondes S , le déplacement en champ libre est horizontal, et le mouvement d'entrée de la base consiste en une composante horizontale, ce qui mène aussi une certaine moyenne de déplacement et rotation en champ libre dans la zone d'encastrement, illustré dans la figure 3.5.b [29].



a) tremblement de terre verticale.



b) tremblement de terre horizontale.

Figure 3.5. Le mouvement en Champ libre et le mouvement d'entrée en vigueur de la fondation pour que l'excitation sismique se propagent verticalement [29].

Pour le mouvement $\{u_0^g(w)\}$, les forces d'interaction agissant sur le nœud $\mathbf{0}$ disparaître, par ce que pour cet état de chargement, l'interface sol-structure est une surface libre. Ce qui implique que les forces d'interaction du sol dépendent de la position par rapport au mouvement d'entrée de la

base efficace $\{u_0^g(w)\}$, et leurs amplitudes peuvent être exprimées comme suit [29]:

$$\{P_0(w)\} = [S_{00}^g(w)](\{u_0^t(w)\} - \{u_0^g(w)\}) \quad (3.26)$$

Tel que :

$\{u_0^g(w)\}$: caractérise l'excitation sismique.

A partir de l'équation (3.26), l'équation (3.25) sera reformulée comme suit :

$$\begin{bmatrix} [S_{SS}(w)] & [S_{S0}(w)] \\ [S_{0S}(w)] & [S_{00}^S(w)] + [S_{00}^g(w)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_S^t(w)\} \\ \{u_0^t(w)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_S(w)\} \\ [S_{00}^g(w)]\{u_0^g(w)\} \end{Bmatrix} \quad (3.27)$$

L'équation (3.27) représente l'équation de mouvement du système sol-structure avec une interface sol-structure rigide exprimée dans les amplitudes de déplacement total [29].

3.5 Equation de mouvement d'une structure contrôlée en tenant compte de l'effet de l'ISS

Pour le développement des équations de mouvement, on considère une structure poteau-poutre à «NO» étages contrôlée activement par des tendons actifs (figure.3.6). Pour tenir compte de l'interaction sol structure, on suppose que la structure repose sur une fondation flexible incorporée dans un sol à plusieurs couches en profondeur dont les caractéristiques peuvent varier d'une couche à une autre mais restent constantes le long de la couche considérée. Dans ce cas l'effet du sol sera représenté par des forces d'interactions notées $R_0(t)$.

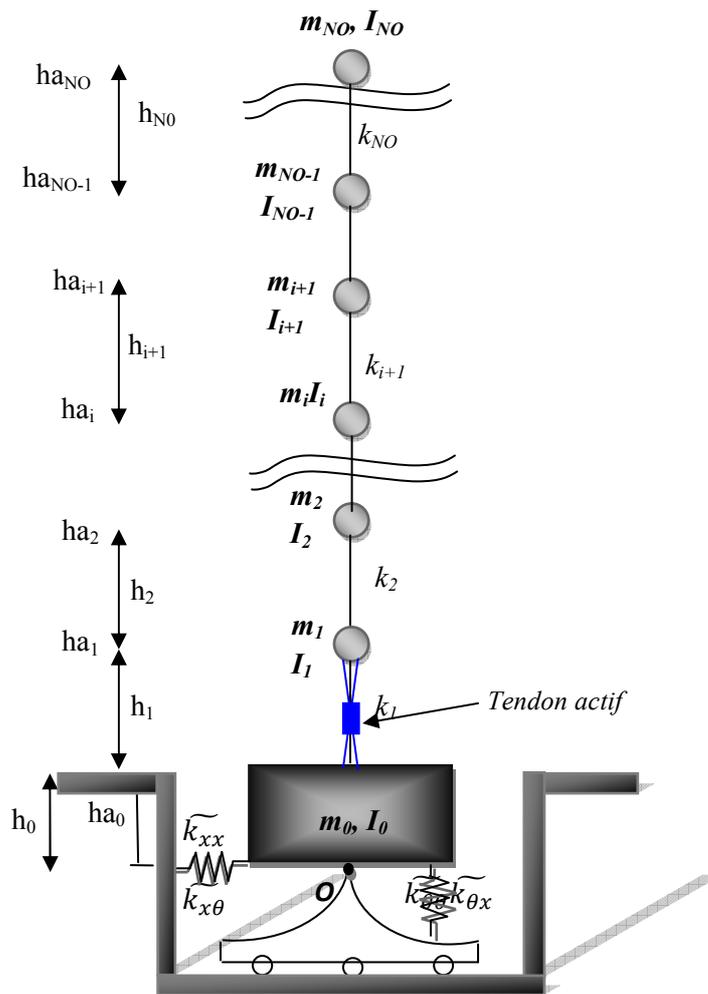


Figure 3.6. Modèle d'une structure équipée par des tendons actifs et avec ISS.

Tel que : m_i, k_i, h_i et I_i désignent la masse, la rigidité, la hauteur et le moment d'inertie par rapport au point 0 du $i^{\text{ème}}$ étage. m_0, k_0 et I_0 sont la masse, la rigidité et le moment d'inertie par rapport au point 0 de la fondation. h_i est la hauteur entre le point de rotation 0 et le centre de gravité de la masse m_i . h_0 est la hauteur entre le point de rotation 0 et le centre de gravité de la masse du fondation.

L'équation du mouvement de ce type de structure en tenant compte de l'effet de l'ISS sera alors, à tout $n^{ième}$ intervalle du temps :

$$[M]\{\ddot{X}^{tg}(n)\} + [C]\{\dot{X}^{tg}(n)\} + [K]\{X^{tg}(n)\} = \{\delta\}\ddot{x}_0^g(n) + [\gamma]\{\vec{U}(n)\} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -R_0(n) \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

Où les matrices $[M]$, $[C]$ et $[K]$ de dimensions $(NO+2) \times (NO+2)$, sont respectivement les matrices de masse, d'amortissement et la rigidité de la structure-fondation.

En séparant les d.d.l de la structure et ceux de la fondation, l'équation (3.28) s'écrira :

$$\begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{S0}] \\ [M_{0S}] & [M_{00}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s^{tg}(n) \\ \dot{x}_0^{tg}(n) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{SS}] & [C_{S0}] \\ [C_{0S}] & [C_{00}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s^{tg}(n) \\ \dot{x}_0^{tg}(n) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{S0}] \\ [K_{0S}] & [K_{00}] + [\tilde{K}_{00}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s^{tg}(n) \\ x_0^{tg}(n) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_S \\ \delta_0 \end{Bmatrix} \ddot{x}_0^g(n) + \begin{bmatrix} \gamma_S \\ \gamma_0 \end{bmatrix} \{\vec{U}(n)\} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -R_0(n) \end{Bmatrix} \quad (3.29)$$

Où les matrices $[M_{SS}]$, $[C_{SS}]$ et $[K_{SS}]$ de dimensions $(NO \times NO)$, sont respectivement les masses diagonales des planchers, la matrice proportionnelle d'amortissement et la rigidité des poteaux symétriques de la structure. Les matrices $[M_{S0}]$, $[C_{S0}]$ et $[K_{S0}]$ sont de dimensions $(NO \times 2)$ et les matrices $[M_{0S}]$, $[C_{0S}]$ et $[K_{0S}]$ de dimensions $(2 \times NO)$ sont respectivement les matrices masse, rigidité et amortissement lié à la superstructure et à la fondation rigide. Les matrices $[M_{00}]$, $[C_{00}]$ et $[K_{00}]$ de dimensions (2×2) , sont respectivement la masse, la rigidité et l'amortissement lié à la fondation rigide.

Le vecteur $\{\delta_S\}$ de dimension $(NO \times 1)$, est le vecteur des coefficients d'accélération horizontal du sol pour la superstructure. Le vecteur $\{\delta_0\}$ de dimension (2×1) , est le vecteur des coefficients d'accélération horizontal du sol pour la fondation.

La matrice $[\gamma_S]$ de dimension $(NO \times NCR)$ et la matrice $[\gamma_0]$ de dimension $(2 \times NCR)$ sont respectivement les matrices de localisation des contrôleurs de la superstructure et de la fondation, NCR étant le nombre de contrôleur actifs.

$\{X_s^{tg}(n)\}$ de dimension $(NO \times 1)$ représente le vecteur de déplacement des étages $(x_{NO}^{tg} x_{NO-1}^{tg} \dots x_i^{tg} \dots x_2^{tg} x_1^{tg})^T$ et $\{X_0^{tg}(n)\}$ de dimension (2×1) est le vecteur de déplacement et rotation de la fondation au point "O" $(x_0^{tg}, \theta_0^{tg})^T$ comme illustré dans la figure 3.7.

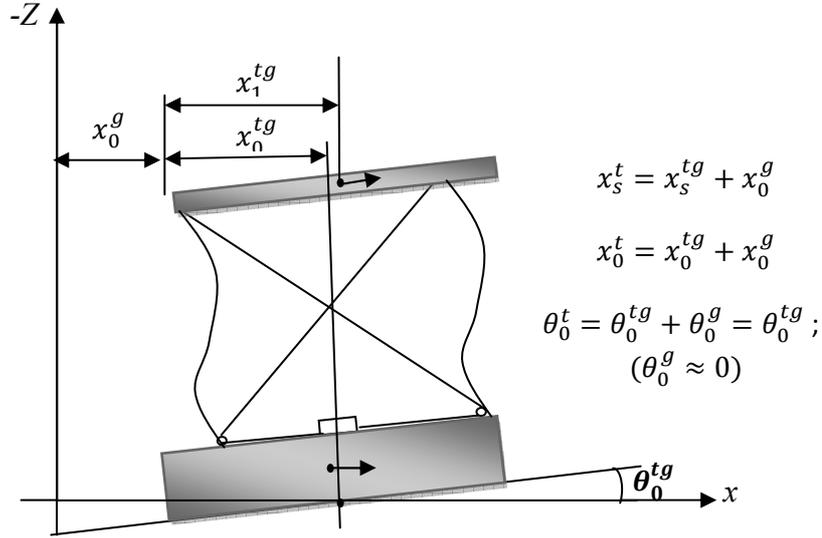


Figure 3.7. Les déplacements de la structure $\{x_s^t(n)\}$ et de la fondation $\{x_0^t(n)\}$.

Le vecteur $\{R_0(n)\} = [R_x(n) \ R_\theta(n)]^T$ de dimension (2×1) , $R_x(n)$ est la force d'interaction horizontale et $R_\theta(t)$ est le moment d'interaction au point 0.

✓ **Matrice masse**

$$[M_{SS}] = \begin{bmatrix} m_{NO} & & & & & & & & & 0 \\ & m_{NO-1} & & & & & & & & \\ & & \dots & & & & & & & \\ \vdots & & & \dots & & & & & & \vdots \\ & & & & m_i & & & & & \\ & & & & & \dots & & & & \\ 0 & & & & & & \dots & & & m_2 \\ & & & & & & & & & m_1 \end{bmatrix}_{NO \times NO} \quad (3.30)$$

$$[M_{S_0}] = [0]_{NO \times 2} \quad (3.31)$$

$$[M_{0S}] = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ -h_{aNO} m_{NO} & \dots & -h_{ai} m_i & \dots & -h_{a1} m_1 \end{bmatrix}_{2 \times NO} \quad (3.32)$$

$$[M_{00}] = \begin{bmatrix} m_0 & -h_{a0} m_0 \\ -h_{a0} m_0 & \sum_{i=0}^{NO} I_i + h_{a0}^2 m_0 \end{bmatrix}_{2 \times 2} \quad (3.33)$$

✓ **Le déplacement et rotation de la fondation**

$$\{X_0^{tg}(n)\} = [x_0^{tg} \quad \theta_0^{tg}]^T \quad (3.50)$$

✓ **Le vecteur forces de contrôle**

$$\{\vec{U}(n)\} = [\vec{U}_{NCR}(n) \vec{U}_{NCR-1}(n) \dots \vec{U}_i(n) \dots \vec{U}_2(n) \vec{U}_1(n)]^T \quad (3.51)$$

✓ **Calcul de la force d'interaction à l'interface Sol-Fondation**

$\{X_0^{tg}(t)\}$ et $\{R_0(t)\}$ au temps t sont liés par la matrice de flexibilité du système au sol par l'intégrale de convolution suivant [11]:

$$\{X_0^{tg}(t)\} = \int_0^\infty [F_{00}^g(\tau)] \{R_0(t - \tau)\} d\tau \quad (3.52)$$

Avec :

$[F_{00}^g(\tau)]$ est la matrice de la flexibilité dynamique du sol.

Où $[F_{00}^g(w)] = [S_{00}^g(w)]^{-1}$, tel que $[S_{00}^g(w)]$ est la matrice de la rigidité dynamique du sol, elle est défini en détail dans la section suivante.

Puisque la solution de l'équation d'état est constante dans le domaine de temps discret, l'intégrale de solution peut être remplacée par sa sommation :

$$\{X_0^{tg}(n)\} = \Delta t \sum_{m=0}^n [F_{00}^g(m)] \{R_0(n - m)\} \quad (3.53)$$

Dans le système à temps discret avec un intervalle de temps égal à Δt , les forces d'interactions peuvent être écrites comme suit:

$$\{R_0(n)\} = [\tilde{K}_{00}] \{X_0^{tg}(n)\} - \{\tilde{R}_0(n - 1)\} \quad (3.54)$$

Où $[\tilde{K}_{00}]$ est constante et $\{\tilde{R}_0(n - 1)\}$ dépend du déplacement du système au sol et les forces d'interactions dans les étapes précédentes. Les deux peuvent être exprimés comme suit [11]:

$$[\tilde{K}_{00}] = \frac{1}{\Delta t} [F_{00}^g(0)]^{-1} \quad (3.55)$$

Et

$$\{\tilde{R}_0(n - 1)\} = \frac{1}{\Delta t} [F_{00}^g(0)]^{-1} [\{X_0^{tg}(n - 1)\} + (\sum_{m=1}^n \Delta t [F_{00}^g(m)] \{R_0(n - m)\})] \quad (3.56)$$

✓ **Calcul de la matrice de flexibilité dynamique du sol**

La Figure 3.8 suivante montre que le sol est considéré comme deux parties, une partie cylindrique avec un rayon r_0 s'étendant en couches à une profondeur e dans le demi-espace.

Cette région du sol est composée par des disques rigides séparés par des couches de sol, qui sera ensuite fouillé [29].

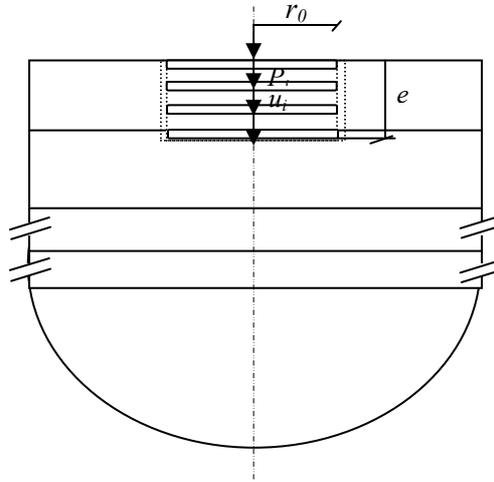


Figure 3.8. La partie du sol excavé.

Des efforts verticaux inconnus P_i sont appliqués sur ces disques à la surface, ce qui peut être considéré comme redondants. Ces forces redondantes agissent sur les disques embarqués. Le déplacement de ces forces est de la forme [29] :

$$\{u(w)\} = [G(w)]\{P(w)\} \quad (3.57)$$

L'inverse de l'équation (3.57) donne :

$$\{P(w)\} = [S^f(w)]\{u(w)\} \quad (3.58)$$

Avec :

$$[S^f(w)] = [G(w)]^{-1} \quad (3.59)$$

Et

$$\{M(w)\} = [S_v^f(w)]\{u(w)\} \quad (3.60)$$

Tel que $[S^f(w)]$ est la matrice de rigidité dynamique en champ libre, et $[S_v^f(w)]$ concerne la rotation. $\{M(w)\}$ est le vecteur des moments agissant sur la structure.

Dans une base rigide intégrée comme illustrée dans la figure 3.9 suivante, les déplacements verticaux doivent être égaux au déplacement vertical de la base, avec une amplitude $u_0(w)$, tel qu'il est exprimé comme suit :

$$\{u(w)\} = \{A\}u_0(w) \quad (3.61)$$

Tel que : $\{A\}$ est le vecteur de contrainte cinématique, $\{A\} = \{1 \quad 1 \quad \dots \quad 1\}^T$.

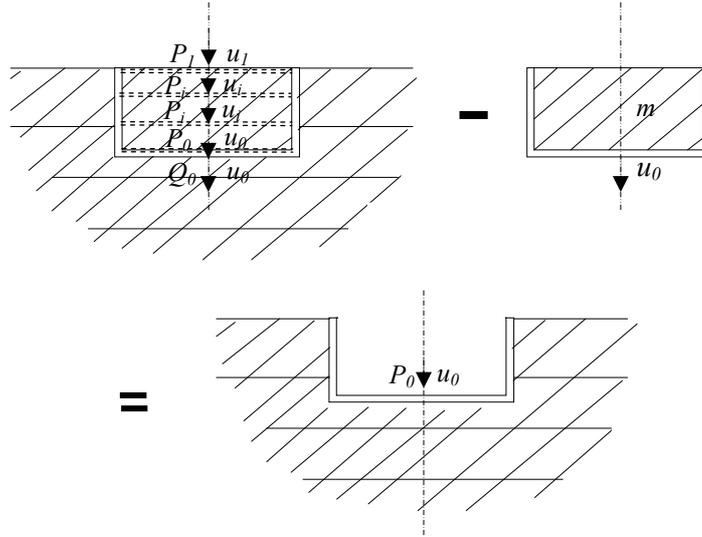


Figure 3.9. Application de la méthode sous structure et représentation de degré de liberté vertical.

En équilibre on a :

$$Q_0(w) = \{A\}^T \{P(w)\} \quad (3.62)$$

Où : $Q_0(w)$ est la force agissante sur la base.

En remplaçant l'équation (3.61) dans l'équation (3.58), puis dans l'équation (3.62) :

$$Q_0(w) = \{A\}^T [S^f(w)] \{A\} u_0(w) \quad (3.63)$$

Où : $Q_0(w)$ représente le coefficient de la rigidité dynamique verticale du système dynamique.

Pour trouver la force d'interaction $P_0(w)$, on soustraye la masse m multipliée par l'accélération \ddot{u}_0 du domaine d'excavation du sol comme montré dans la figure 3.8.

$$P_0(w) = \{A\}^T [S^f(w)] \{A\} u_0(w) - m \ddot{u}_0(w) \quad (3.64)$$

En mouvement harmonique on a :

$$\ddot{u}_0(w) = -w^2 u_0(w) \quad (3.65)$$

On remplace l'équation (3.65) dans l'équation (3.64) :

$$P_0(w) = S_{00}^g(w) u_0(w) \quad (3.66)$$

Où : $S_{00}^g(w)$ est le coefficient de la rigidité dynamique verticale de la fondation rigide intégrée.

Avec :

$$S_{00}^g(w) = \{A\}^T [S^f(w)] \{A\} + w^2 m \quad (3.67)$$

Ce coefficient apparait comme une contribution du sol sans limite comme montré dans l'équation du mouvement (3.27).

Pour un séisme vertical, en champ libre le mouvement des disques n'est pas chargé, l'équation suivante est la relation force déplacement définit à partir de l'équation (3.57) [29] :

$$\{u^t(w)\} - \{u^f(w)\} = [G(w)] \{P(w)\} \quad (3.68)$$

Tel que : $\{u^t(w)\}$ est le déplacement total, et $\{u^f(w)\}$ est le déplacement au niveau des disques en champ libre pour un séisme vertical.

A partir de l'équation (3.68), l'équation (3.66) devient comme suit :

$$P_0(w) = S_{00}^g(w) u_0^t(w) - \{A\}^T [S^f(w)] \{u^f(w)\} \quad (3.69)$$

Pour trouver l'amplitude du mouvement de fondation efficace, en met $P_0(w) = 0$ et en remplace $u_0^t(w)$ par $u_0^g(w)$ dans l'équation (3.69) :

$$u_0^g(w) = \left(S_{00}^g(w) \right)^{-1} \{A\}^T [S^f(w)] \{u^f(w)\} \quad (3.70)$$

D'après la figure 3.10, on a deux degrés de liberté : un déplacement horizontale avec une amplitude $\{u(w)\}$ et une rotation avec une amplitude $\{v(w)\}$ aux disques de la zone d'excavation, et au disque liée à la base à un déplacement horizontale avec une amplitude $\{u_0(w)\}$ et une rotation avec une amplitude $\{v_0(w)\}$ [29].

$$\begin{Bmatrix} \{u(w)\} \\ \{v(w)\} \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} \{u_0(w)\} \\ \{v_0(w)\} \end{Bmatrix} \quad (3.71)$$

Tel que : $\{u_i(w)\} = \{u_0(w)\} + h_i \{v_0(w)\}$ et $\{v_i(w)\} = \{v_0(w)\}$.

Le vecteur d'amplitude de force à la base correspondant de $\{u_0(w)\}$ et $\{v_0(w)\}$ est [29] :

$$\begin{Bmatrix} \{Q_0(w)\} \\ \{R_0(w)\} \end{Bmatrix} = [A]^T \begin{Bmatrix} \{P(w)\} \\ \{M(w)\} \end{Bmatrix} \quad (3.72)$$

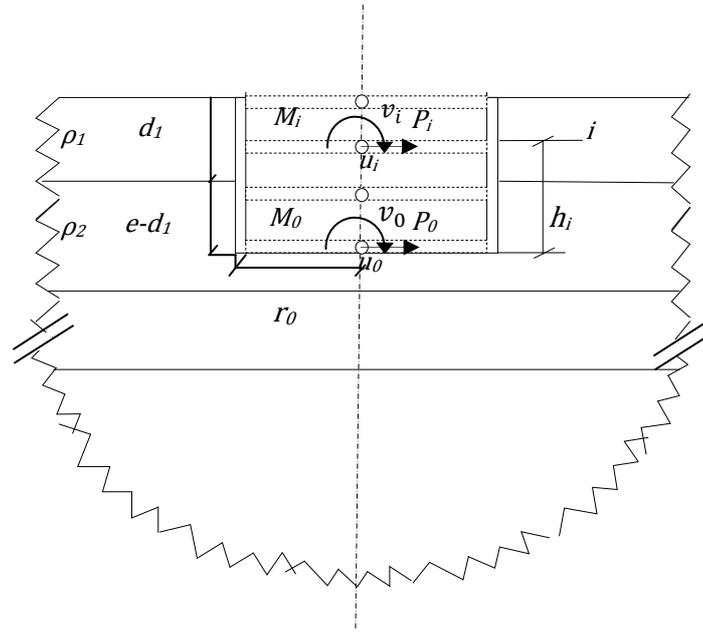


Figure 3.10. Représentation des degrés de liberté de la masse du sol emprisonnée [29].

En remplaçant l'équation (3.72) dans l'équation (3.58) et l'équation (3.60), qui sont ensuite remplacées dans l'équation (3.73), ce qui résulte :

$$\begin{Bmatrix} \{Q_0(w)\} \\ \{R_0(w)\} \end{Bmatrix} = [A]^T \begin{bmatrix} S^f(w) & \\ & S_v^f(w) \end{bmatrix} [A] \begin{Bmatrix} \{u_0(w)\} \\ \{v_0(w)\} \end{Bmatrix} \quad (3.74)$$

A partir de l'équation (3.72), l'équation (3.66) est généralisée comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \{P_0(w)\} \\ \{M_0(w)\} \end{Bmatrix} = [S_{00}^g(w)] \begin{Bmatrix} \{u_0(w)\} \\ \{v_0(w)\} \end{Bmatrix} \quad (3.75)$$

Tel que :

$$[S_{00}^g(w)] = [A]^T \begin{bmatrix} S^f(w) & \\ & S_v^f(w) \end{bmatrix} [A] + w^2 [M] \quad (3.76)$$

Avec : $[M]$ est la matrice masse correspond à $\{\{u_0(w)\} \quad \{v_0(w)\}\}^T$.

D'après l'exemple représenté dans la figure 3.10, la matrice $[M]$ est sous la forme [29] :

$$[M] = \pi r_0^2 \begin{bmatrix} d_1 \rho_1 + (e - d_1) \rho_2 & d_1 \left(e - \frac{d_1}{2} \right) \rho_1 + \frac{(e - d_1)^2}{2} \rho_2 \\ d_1 \left(e - \frac{d_1}{2} \right) \rho_1 + \frac{(e - d_1)^2}{2} \rho_2 & d_1 \rho_1 \left(e^2 - e d_1 + \frac{d_1^2}{3} + \frac{r_0^2}{4} \right) + (e - d_1) \rho_2 \left(\frac{(e - d_1)^2}{3} + \frac{r_0^2}{4} \right) \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

Pour un séisme horizontal, en procédant comme pour la direction verticale, alors l'équation (3.68) s'applique toujours [29].

Le mouvement d'entrée efficace de la fondation constitué d'une composante horizontale et une composante de rotation comme montré dans l'équation suivante [29] :

$$\begin{Bmatrix} u_0^g(w) \\ v_0^g(w) \end{Bmatrix} = [S_{00}^g(w)]^{-1} [A]^T \begin{Bmatrix} [S^f(w)] \{u^f(w)\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (3.78)$$

Dans le cas d'un sol presque incompressible ou incompressible, l'équation (3.67) devient [29] :

$$[S_{00}^g(w)] = [A]^T [S^f(w)] [A] + w^2 (m - \Delta M) \quad (3.79)$$

Et l'équation (3.76) devient :

$$[S_{00}^g(w)] = [A]^T \begin{bmatrix} S^f(w) & \\ & S_v^f(w) \end{bmatrix} [A] + w^2 \left[[M] - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \Delta M_v \end{bmatrix} \right] \quad (3.80)$$

Pour le premier degré de liberté vertical, la masse emprisonnée est de la forme [29] :

$$\Delta M = 2.4 \left(\nu - \frac{1}{3} \right) \rho A_0 r_0 \quad (3.81)$$

Et pour le deuxième degré de liberté de rotation, le moment d'inertie de la masse emprisonnée est formulé comme suit [29] :

$$\Delta M_v = 1.2 \left(\nu - \frac{1}{3} \right) \rho I_0 r_0 \quad (3.82)$$

Avec :

ν : est le coefficient du poison du sol,

r_0 : est le rayon de la masse excavé du sol.

ρ : est la masse volumique du sol excavé.

$A_0 = \pi r_0^2$: est la surface de la masse du sol excavé.

$I_0 = \pi \frac{r_0^4}{4}$: est l'inertie de la masse du sol excavé.

3.6 Equation d'état du modèle étudié

L'équation (3.29) devient :

$$\begin{aligned}
 \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s^{tg}(n) \\ \ddot{x}_0^{tg}(n) \end{Bmatrix} = & \\
 - \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{S0}] \\ [M_{0S}] & [M_{00}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [C_{SS}] & [C_{S0}] \\ [C_{0S}] & [C_{00}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s^{tg}(n) \\ \dot{x}_0^{tg}(n) \end{Bmatrix} - & \\
 \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{S0}] \\ [M_{0S}] & [M_{00}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{S0}] \\ [K_{0S}] & [K_{00}] + [\tilde{K}_{00}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s^{tg}(n) \\ x_0^{tg}(n) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{S0}] \\ [M_{0S}] & [M_{00}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \delta_s \\ \delta_0 \end{Bmatrix} \ddot{x}_0^g(n) + & \\
 \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{S0}] \\ [M_{0S}] & [M_{00}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \gamma_s \\ \gamma_0 \end{Bmatrix} \{\bar{U}(n)\} + \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{S0}] \\ [M_{0S}] & [M_{00}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ \tilde{R}_0(n-1) \end{Bmatrix} & \quad (3.83)
 \end{aligned}$$

On suppose pour résoudre ce système, le vecteur d'état $Z^{tg}(n)$ de dimension $(2(\text{NO}+2) \times 1)$:

$$Z^{tg}(n) = \begin{Bmatrix} \{x_s^{tg}(n)\} \\ \{x_0^{tg}(n)\} \\ \{\dot{x}_s^{tg}(n)\} \\ \{\dot{x}_0^{tg}(n)\} \end{Bmatrix} \quad (3.84)$$

En remplaçant l'équation (3.84) dans (3.83) on trouve l'équation d'état suivante :

$$\{\dot{Z}^{tg}(n)\} = [A]\{Z^{tg}(n)\} + [B]\{\bar{U}(n)\} + \{E(n)\} \quad (3.85)$$

On peut écrire l'équation (3.85) sous la forme :

$$\{\dot{Z}^{tg}(n)\} = [D]\{Z^{tg}(n)\} + \{E(n)\} \quad (3.86)$$

Où [D] est la matrice "plant" indépendante du temps, de dimension $(2(\text{NO}+2) \times 2(\text{NO}+2))$:

$$[D] = [A] + [B][G^{ISS}] \quad (3.87)$$

Avec :

[A] est la matrice caractéristique du système contrôlé, de dimension $(2(\text{NO}+2) \times 2(\text{NO}+2))$:

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[A_K] & -[A_C] \end{bmatrix} \quad (3.88)$$

$$[A_K] = \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{S0}] \\ [M_{0S}] & [M_{00}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{S0}] \\ [K_{0S}] & [K_{00}] + [\tilde{K}_{00}] \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

$$[A_C] = \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{S0}] \\ [M_{OS}] & [M_{00}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [C_{SS}] & [C_{S0}] \\ [C_{OS}] & [C_{00}] \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

[B] est la matrice de localisation des actionneurs, de dimension $(2(NO+2) \times NCR)$:

$$[B] = \begin{bmatrix} [0] & & \\ \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{S0}] \\ [M_{OS}] & [M_{00}] \end{bmatrix}^{-1} & \begin{bmatrix} [Y_S] \\ [Y_0] \end{bmatrix} & \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

{E} est le vecteur de perturbations externes, de dimension $(2(NO+2) \times 1)$:

$$\{E(n)\} = \{C\}\ddot{x}_0^g(n) + \{\check{R}_0(n-1)\} \quad (3.92)$$

{C} est le vecteur lié à l'accélération de base de structure, de dimension $(2(NO+2) \times 1)$:

$$\{C\} = \left\{ \begin{array}{c} [0] \\ \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{S0}] \\ [M_{OS}] & [M_{00}] \end{bmatrix}^{-1} \\ \begin{bmatrix} \{\delta_S\} \\ \{\delta_0\} \end{bmatrix} \end{array} \right\} \quad (3.93)$$

{\check{R}_0(n)} est le vecteur des accélérations, de dimension $(2(NO+2) \times 1)$:

$$\{\check{R}_0(n-1)\} = \left\{ \begin{array}{c} [0] \\ \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{S0}] \\ [M_{OS}] & [M_{00}] \end{bmatrix}^{-1} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ \check{R}_0(n-1) \end{bmatrix} \end{array} \right\} \quad (3.94)$$

Et {\check{R}_0} est le vecteur dynamique des forces équivalentes, défini dans l'équation (3.56).

3.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de définir le cadre théorique du phénomène d'ISS pour bien comprendre ces effets qui ne sont pas négligeables en réalité, ce qui nous montre aussi que l'ISS est un problème complexe malgré les grandes recherches faites dans ce domaine.

Pour prendre en compte l'effet de l'interaction sol-structure, il faut tout d'abord comprendre la méthode où on veut l'utiliser dans ce problème, il existe plusieurs méthodes dans la littérature, nous avons détaillé quelques méthodes ce qui nous aidera dans la suite dans notre programme.

Par ailleurs, il ne faut pas perdre de vue que le choix de la méthode utilisé est l'un des grands problèmes dans la prise en compte de l'effet de l'ISS.

Dans notre travail, on s'est surtout intéressé à la méthode de sous-structure.

CHAPITRE 04

Les algorithmes de contrôle actif

4.1 Introduction

Beaucoup de systèmes d'ingénierie subissent des vibrations indésirables. Le contrôle des vibrations des systèmes mécaniques est un problème important au moyen duquel les vibrations sont supprimées ou au moins atténuées.

Le contrôle est le nom donné à la tâche de parvenir à un résultat souhaité. Il est appliqué à des structures de génie civil pour offrir une protection contre les effets néfastes de la force sismique destructive ou de l'inconfort de l'homme sur le mouvement structurel induit par le vent fort et d'autres types de vibrations.

L'origine de la notion du contrôle structurelle revient aux chercheurs japonais *Kobori* et *Minai* en 1950 [7], ils sont conclus que les caractéristiques précises des mouvements sismiques vis-à-vis d'un bâtiment ne peuvent être prédites, donc la réponse sismique doit être contrôlée sur l'extrémité de réception de la structure du bâtiment.

On a déjà dit au chapitre 02 que les systèmes de contrôle structurels peuvent être classés en quatre catégories : passif, actif, semi-actif et hybride. Chacun des systèmes précités de contrôle structurel devrait disposer de l'algorithme de contrôle optimal approprié aux caractéristiques du système et de ses charges environnementales [13].

Ces dernières années, plusieurs algorithmes pour le contrôle actif des structures ont été développés. Ces algorithmes de contrôle sont des éléments importants de systèmes de contrôle actif qui influent sur l'efficacité, la robustesse et la fiabilité des systèmes structurels actifs. Ils sont utilisés pour déterminer la force de contrôle.

4.2 Les stratégies du contrôle actif

Il existe deux types d'approche du contrôle actif, le contrôle par anticipation et le contrôle par rétroaction. Bien que ce chapitre soit entièrement consacré aux algorithmes de contrôle actif par rétroaction, il est important de souligner les principales caractéristiques des deux approches, afin de permettre à l'utilisateur de sélectionner le plus approprié pour une application donnée.

Le contrôle par anticipation (*feedforward*) a été développé en 1933 grâce aux travaux de *Lueg*. En 1956, *Conover* a modifié le travail du *Lueg*, il propose d'utiliser le signal de référence à la place de microphone de détection de *Lueg*. Le contrôle par rétroaction (*feedback*) est développé en 1953 par *Olson* et *May*, ensuite *Conover* introduit le concept du capteur d'erreur [47].

4.2.1. Le contrôle par rétroaction (*feedback*)

Le principe du contrôle actif par rétroaction (*feedback*) est de minimiser l'intensité des vibrations indésirables par une mesure fournie par des capteurs plus ou moins

intégrés dans la structure [57]. Cette méthode de contrôle est la plus utilisée à cause de sa simplicité comme le montre la figure 4.1 :

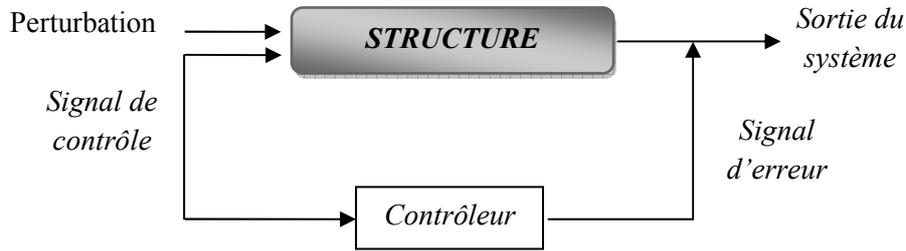


Figure 4.1. Principe de contrôle actif par rétroaction (feedback)[47].

La figure 4.1 implique que le contrôle résulte uniquement du traitement d'un signal d'erreur à la réponse structurale détectée. Ces signaux filtrés par le contrôleur, commandent alors les actionneurs du contrôle. Dans le cas d'une perturbation persistante, ces signaux ne peuvent pas annuler sous peine d'annuler également le contrôle, ce qui implique plus l'erreur est faible, plus le gain de contrôle devrait être élevé, au détriment de la stabilité du système.

Le fonctionnement du contrôle actif par feedback : Le contrôle par rétroaction est basé sur la rétroaction entre la commande des actionneurs et les mesures issues des capteurs. Ces mesures sont injectées dans le contrôleur qui calcule la commande à appliquer sur les actionneurs suivant les objectifs souhaités en termes de comportement vibratoire de la structure [14].

4.2.2. Le contrôle par anticipation (feedforward)

Le contrôle actif par anticipation (*feedforward*) consiste à contrôler les vibrations selon une loi de commande pour but de minimiser les mesures de l'intensité des vibrations indésirables et ces mesures sont basées sur une référence [57], cette technique suppose que la perturbation du système est prévisible [18].

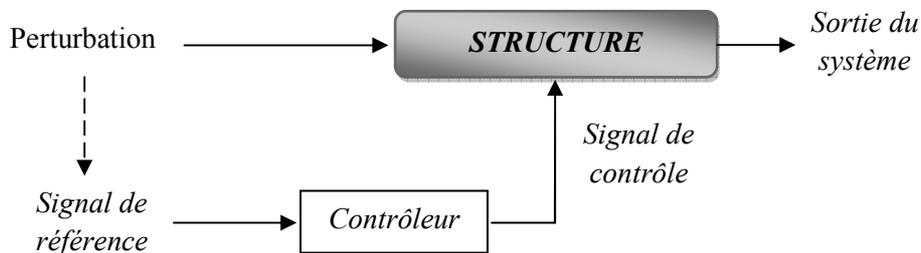


Figure 4.2. Principe de contrôle actif par anticipation (feedforward) [47].

La figure 4.2 implique que le principe de base dans cette méthode de contrôle nécessite un signal de référence corrélé avec la perturbation.

4.3 Les systèmes de contrôle actif par rétroaction (*feedback*)

Dans ce chapitre on va traiter les algorithmes de contrôle actif par rétroaction, la figure 4.3 illustre en détail le principe de fonctionnement du contrôle actif par rétroaction. Il ya trois systèmes de contrôle actif par lequel la loi de commande de rétroaction peut être mise en œuvre pour une structure intelligente sismique :

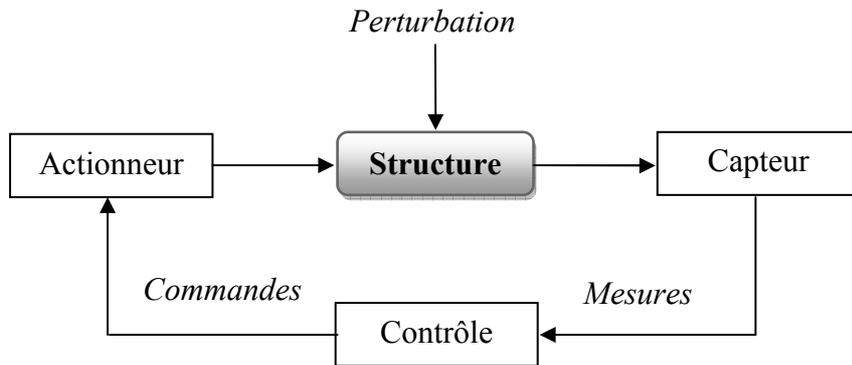


Figure 4.3. Le principe de fonctionnement du contrôle actif par rétroaction [9].

4.3.1 Contrôle de rétroaction en boucle ouverte (*Open-Loop*)

En boucle ouverte la force de contrôle est déterminée par la rétroaction de l'excitation extérieure, tel que les excitations sismiques, où la loi de commande ne nécessite que les informations sur l'excitation sismique. Ce principe de fonctionnement est montré dans la figure suivante :

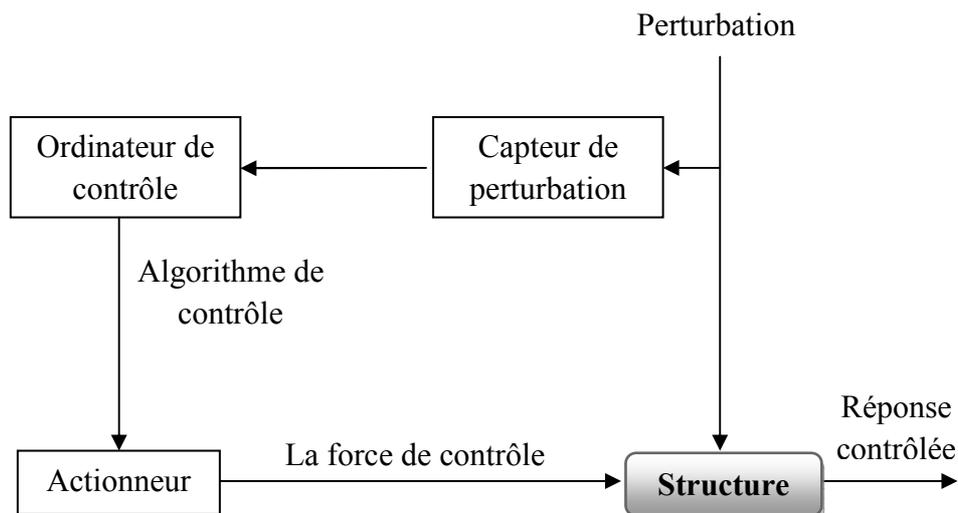


Figure 4.4. Schéma de contrôle actif en boucle ouverte [7].

Le schéma de la figure suivante illustre le principe de contrôle actif en boucle ouverte à l'aide d'un tendon actif :

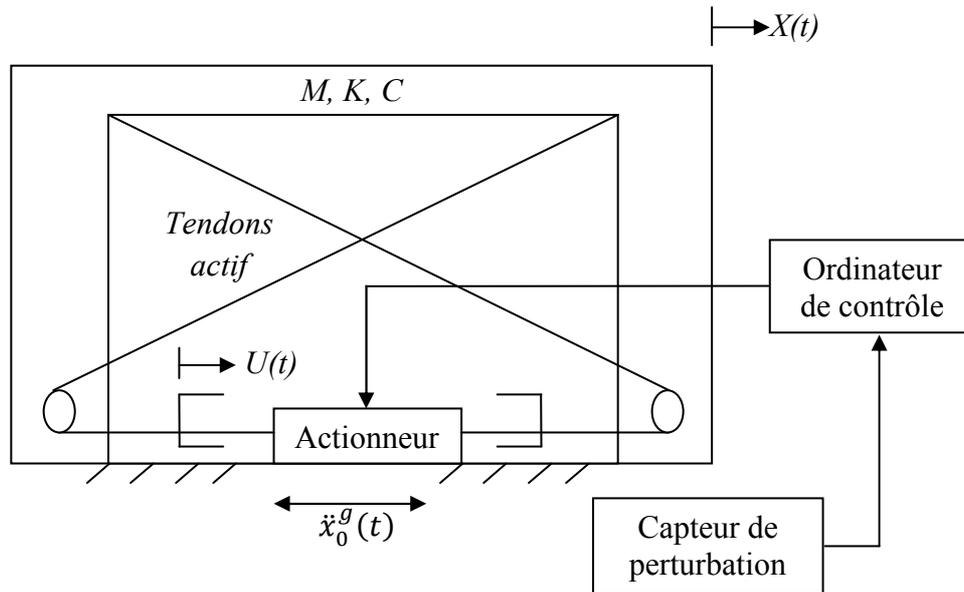


Figure 4.5. Application de contrôle actif en boucle ouverte [7].

Un accéléromètre est placé à la base de la structure du bâtiment pour mesurer l'accélération de l'excitation sismique. Cette information est utilisée pour calculer la force de contrôle exigée, ensuite cette force est appliquée à la structure. L'avantage de ce système de contrôle est que juste l'accéléromètre est nécessaire pour le système de détection. Mais le gain de feedback ne peut pas être trouvé que si l'excitation sismique est connue a priori sur toute la durée du contrôle, ce qui n'est pas possible pour la plupart des structures intelligentes.

4.3.2 Contrôle de rétroaction en boucle fermée (*Closed-Loop*)

En boucle fermée la force de contrôle est déterminée par la rétroaction de la réponse du système exprimée par les variables d'état. Ces variables d'état sont les déplacements structuraux et les vitesses. Dans ce cas, la loi de commande ne nécessite que les informations de la réponse structurale. Le principe est illustré dans la figure 4.6.

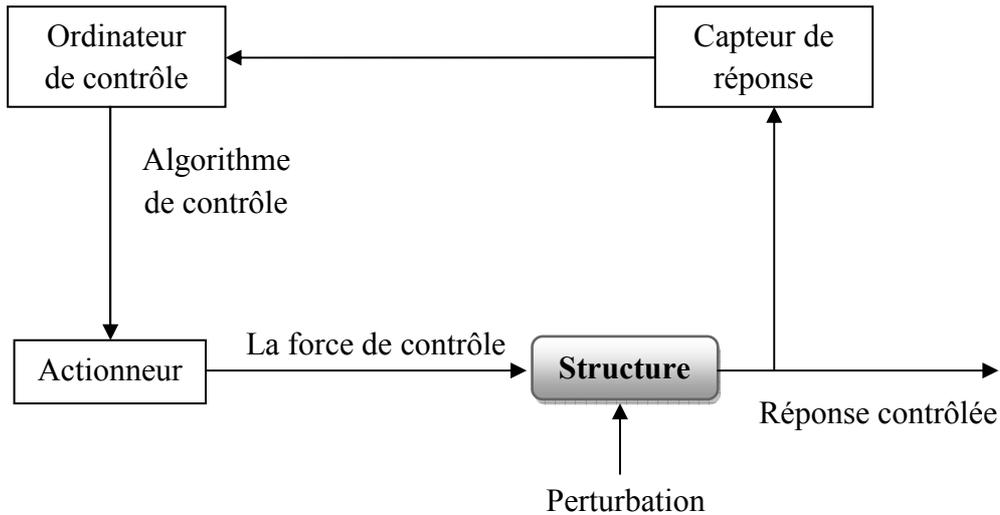


Figure 4.6. Le Schéma du principe de contrôle actif en boucle fermée [7].

Le schéma de la figure suivante illustre le principe de contrôle actif en boucle fermée à l'aide d'un tendon actif :

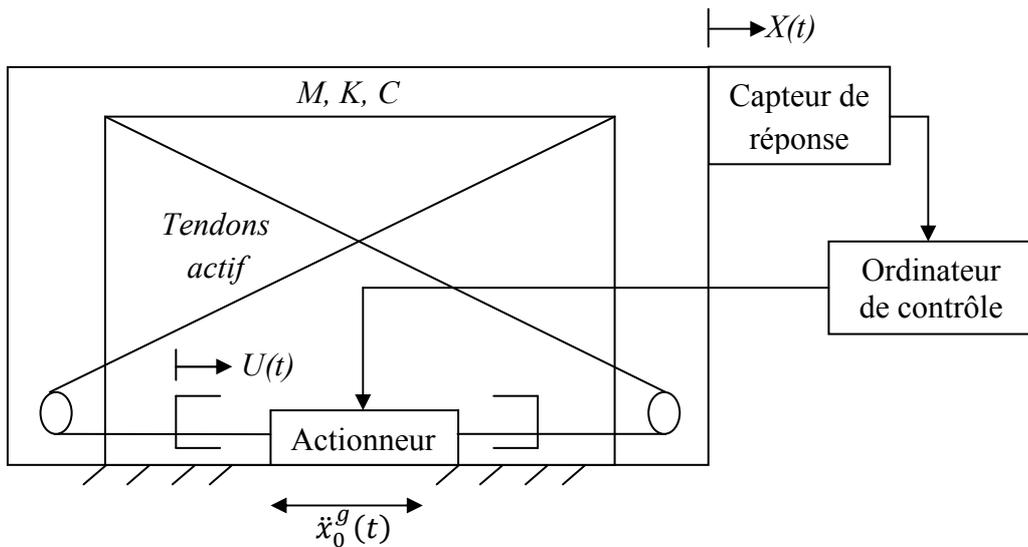


Figure 4.7. Application de contrôle actif en boucle fermée [7].

L'information détectée est utilisée pour calculer la force de contrôle requise sur la base, et ensuite cette force est appliquée à la structure. Pour réaliser un système de contrôle d'ordre $2n$ en boucle fermée, il est nécessaire de faire les mesures des vecteurs d'état. Ainsi, il est nécessaire de faire $2n$ capteurs dans le système pour mesurer la réponse, mais dans le cas où on a utilisé des observateurs ce nombre de capteurs sera réduit.

L'avantage de contrôle en boucle fermée est que les algorithmes sont bien développés pour déterminer le gain de rétroaction, mais sa faiblesse est que ça nécessite un système de détection complexe.

4.3.3 Contrôle de rétroaction en boucle ouverte-fermée (*Open-Closed-Loop*)

Ce système de commande est la combinaison des deux systèmes : contrôle en boucle ouverte et contrôle en boucle fermée, donc censé être supérieur à eux.

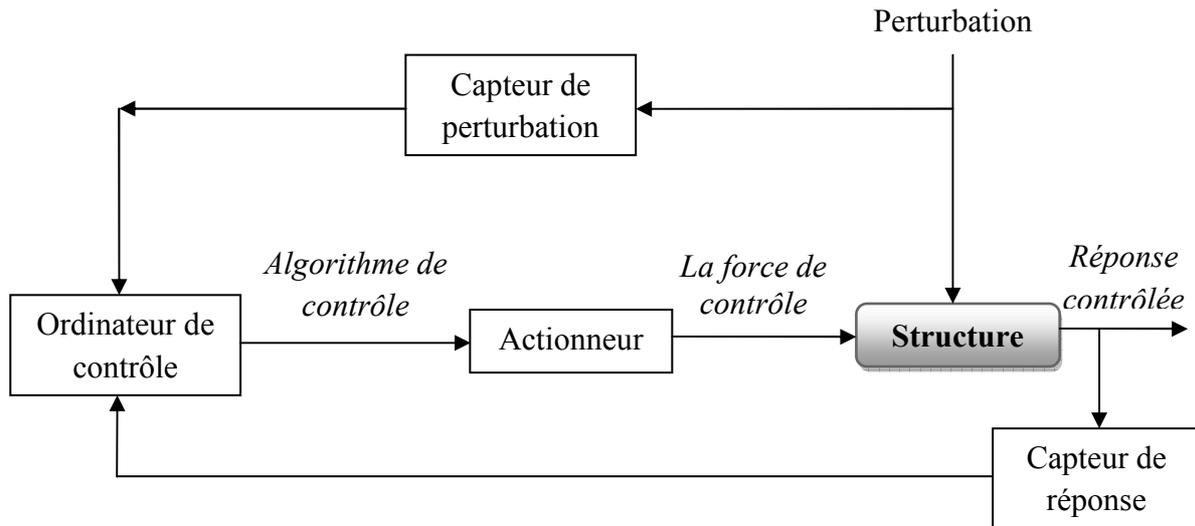


Figure 4.8. Schéma de contrôle actif en boucle ouverte-fermée [7].

Comme le montre la figure 4.8, la loi de commande nécessite l'information de la réponse du système et les perturbations externes.

L'application du contrôle actif en boucle ouverte fermée à l'aide des tendons actifs est illustrée dans la figure suivante :

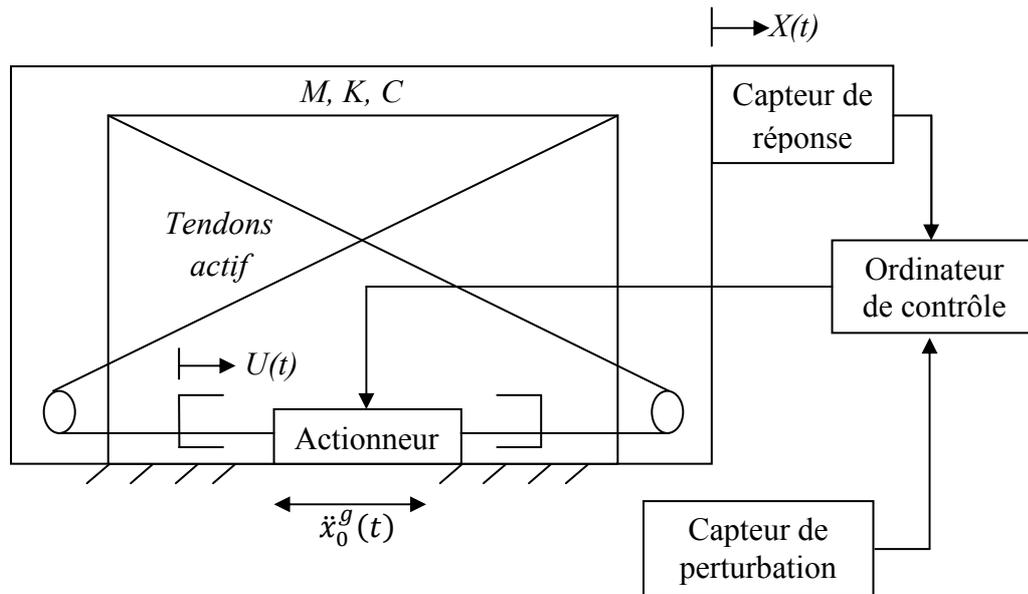


Figure 4.9. Application de contrôle actif en boucle ouverte-fermée [7].

L'accélération de l'excitation sismique, les déplacements relatifs et les vitesses sont mesurés et utilisés pour calculer la force de contrôle requise, et ensuite cette force est appliquée à la structure. Ce cas a le même problème pour déterminer le gain de feedback de contrôle en boucle ouverte.

Donc, le contrôle en boucle fermée est le plus populaire alors que les deux autres sont généralement impossibles pour le contrôle de la réponse sismique.

4.4 Généralités sur les algorithmes de contrôle actif

Les efforts de recherche en matière de contrôle structurel actif ont été axés sur une variété d'algorithmes de contrôle basés sur plusieurs critères de conception de contrôle. Ces algorithmes de contrôle actifs sont utilisés pour déterminer la force de contrôle de la réponse structurelle mesurée. Ils donnent une loi de commande et un modèle mathématique du contrôleur, pour un système de contrôle actif.

Certains sont considérés comme classiques comme ils sont des applications directes de la théorie du contrôle moderne [59]. Parmi eux on peut citer le contrôle optimal actif de Riccati ROAC qui repose sur la performance intégrée sur toute la durée de l'excitation sismique, et permet de déterminer la force de contrôle par la minimisation de l'indice de performance qui est indépendant du temps, en pratique l'intégral de l'indice de performance traité comme une énergie de système pendant un intervalle de temps donnée. Et on peut citer aussi l'algorithme classique de placement de pôles, l'application de cet algorithme dans les ouvrages intelligents en génie civil est très prometteur et pratique [7], cette technique de placement de pôle est proposé pour le contrôle des vibrations d'une structure modélisée comme un système à un seul degré de liberté soumis à une excitation sismique [12].

Ces algorithmes classiques ne sont pas vraiment optimaux, car le terme d'excitation est ignoré dans le calcul de ces algorithmes [59]. Reconnaissant qu'à tout instant t particulier, la connaissance de l'excitation externe peut être disponible à ce moment-là, cette connaissance peut être utilisée pour en arriver à des algorithmes de contrôle améliorés [59].

On a déjà dit que l'algorithme de ROAC est basé sur la minimisation de l'indice de performance, cette minimisation est un problème de variation de temps entre deux valeurs limites fixes qui sont le temps initial et le temps final. La solution de ce problème est de trouver la valeur minimale de l'indice de performance dans cet intervalle de temps. Ainsi, la négligence de terme d'excitation sismique dans le calcul de la matrice de Riccati implique que la valeur minimale de l'indice de performance est toujours zéro [7].

Les lacunes de ce dernier algorithme (ROAC) conduit à l'élaboration d'un algorithme de contrôle actif optimal instantané (IOAC). La différence entre eux est que l'indice de performance de l'algorithme de IOAC dépend du temps au contraire de l'indice de performance de l'algorithme ROAC [7]. Dans l'algorithme d'IOAC la force de contrôle est proportionnelle à l'incrément de temps, cela signifie que la matrice de gain de réaction est très sensible aux intervalles de temps supplémentaire. Pour une structure soumise à un chargement sismique, avec des intervalles de temps différents, l'algorithme d'IOAC donne des forces de contrôle différentes non uniformes. Donc, l'efficacité du contrôle ne peut être assurée pour une structure soumise à différents chargements sismiques au cours de sa vie [7].

A partir de ces défauts de ces algorithmes ROAC et IOAC les chercheurs japonais *Cheng* et *Tian* ont développé une nouvelle technique appelée l'algorithme de contrôle actif optimal généralisé (GOAC) [7], qui est en mesure d'ajuster la matrice de gain de réaction pour obtenir une meilleure contrôlabilité [11].

4.4.1 Modèle du système

On a déjà trouvé l'équation d'état d'un modèle d'une structure contrôlée avec interaction sol structure (figure.3.1) dans le chapitre 3. L'équation suivante est la notation la plus simple de l'équation (3.85) :

$$\{\dot{Z}(t)\} = [A]\{Z(t)\} + [B][\vec{U}(t)] + \{E(t)\} \quad (4.1)$$

Tous les paramètres dans les algorithmes suivant concernent un bâtiment en tenant compte de l'effet de l'interaction sol structure.

4.4.2 Algorithme optimale classique de contrôle linéaire de riccati ROAC

Dans l'algorithme optimal classique linéaire de Riccati, le vecteur de la force de contrôle $\{\vec{U}(t)\}$ doit être choisi de telle sorte qu'un indice de performance J soit minimal, définie comme [59] :

$$J = J_1[Z(t_0), Z(t_f), t_0, t_f] + \int_{t_0}^{t_f} J_2(Z, \dot{Z}, U, \dot{U}, t) dt \quad (4.2)$$

L'indice de performance J a deux termes : le premier terme J_1 est une fonction de pénalité de l'étape de début-fin, qui ne dépend que des temps initial et final de l'intervalle de temps donné $[t_0, t_f]$ et sur les états évalués lors de ces deux instants. Le second terme J_2 est une partie intégrante évaluée sur l'intervalle du temps $[t_0, t_f]$.

Dans l'équation (4.2), J est un scalaire fonctionnel qui doit être minimisée par rapport à $\{\vec{U}(t)\}$, tout en satisfaisant l'équation d'état.

En général pour l'étude de contrôle structural, le choix de la forme de l'indice de performance J est quadratique en $Z(t)$ et $\{\vec{U}(t)\}$. Il est écrit comme suit [7]:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [\{Z(t)\}^T [Q] \{Z(t)\} + \{U(t)\}^T [R] \{U(t)\}] dt \quad (4.3)$$

Les matrices $[Q]$ et $[R]$ sont considérées comme des matrices de pondération, dont les grandeurs sont attribuées en fonction de l'importance relative accordée aux variables d'état et aux forces de contrôle dans la procédure de minimisation. $[Q]$ est la matrice d'état semi définie positive, elle est de dimension $(2(NO+2) \times 2(NO+2))$. $[R]$ est la matrice de contrôle pondération définie positive, elle est de dimension $(NCR \times NCR)$.

Par de grandes valeurs de $[Q]$, le déplacement sera réduit et la force de contrôle augmente. A l'inverse pour de grandes valeurs de $[R]$, ce sont les forces de contrôle qui sont réduites et le déplacement sera important. Ainsi, en faisant varier les amplitudes relatives de $[Q]$ et $[R]$, on peut synthétiser les contrôleurs de parvenir à un bon échange entre l'efficacité de contrôle et la consommation d'énergie de contrôle [59].

Pour résoudre le problème de contrôle optimal où J est défini par l'équation (4.3) avec la restriction représentée par l'équation d'état, le lagrangien L est d'abord formé en adjoignant ces deux équations, ce qui donne [59] :

$$L = \int_{t_0}^{t_f} \left[\{Z(t)\}^T [Q] \{Z(t)\} + \frac{1}{2} \{U(t)\}^T [R] \{U(t)\} + \{\lambda(t)\}^T ([A] \{Z(t)\} + [B] \{U(t)\} + \{E(t)\} - \{\dot{Z}(t)\}) \right] \quad (4.4)$$

Où : λ est un variant dans le temps, appelé multiplicateur de Lagrange

Les conditions nécessaires qui définissent le contrôle optimal peuvent être trouvées en prenant la première variation du Lagrangien par rapport aux variables d'état et de contrôle, et la mise à zéro. Prenant la première variante de l'équation de L on obtient [59] :

$$\delta L = -\{\lambda(t_f)\}^T \{Z(t_f)\} + \{\lambda(t_i)\}^T \{Z(t_i)\} + \int_{t_0}^{t_f} \left(\{\lambda(t)\}^T + \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \{Z(t)\}} \delta \{Z(t)\} + \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \{U(t)\}} \delta \{U(t)\} \right) dt \quad (4.5)$$

Où \mathcal{H} est l'Hamiltonien défini comme l'intégrale de l'équation de L [59], l'Hamiltonien \mathcal{H} s'écrit [7]:

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2} \{Z(t)\}^T [Q] \{Z(t)\} + \frac{1}{2} \{U(t)\}^T [R] \{U(t)\} + \{\lambda(t)\}^T ([A] \{Z(t)\} + [B] \{U(t)\} - \{\dot{Z}(t)\}) \quad (4.6)$$

Maintenant, $\delta \{Z(t_0)\} = 0$ puisque $\{Z(t_i)\} = Z_0$ est une constante donnée. Donc en exigeant $\delta L = 0$, on doit avoir ces conditions qui sont nécessaires pour un contrôle optimal [59]:

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \{U(t)\}} = 0 \quad \text{pour} \quad t_i \leq t \leq t_f \quad (4.7)$$

$$\{\lambda(t)\}^T + \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \{Z(t)\}} = 0 \quad (4.8)$$

Avec condition aux limites :

$$\{\lambda(t_f)\}^T = 0 \quad (4.9)$$

De la théorie des fonctionnelles, les équations d'Euler sont les conditions nécessaires d'optimalité (équation (4.7) et (4.8)), elles sont exprimées comme suit [7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial \{Z(t)\}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial H}{\partial \{\dot{Z}(t)\}} \right) = \{0\} \\ \frac{\partial H}{\partial \{U(t)\}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial H}{\partial \{\dot{U}(t)\}} \right) = \{0\} \\ \frac{\partial H}{\partial \{\lambda(t)\}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial H}{\partial \{\dot{\lambda}(t)\}} \right) = \{0\} \end{cases} \quad (4.10)$$

Lors de l'exécution des dérivées partiels nécessaires de \mathcal{H} par rapport à $\{U(t)\}$ et $\{Z(t)\}$, on obtient [59] :

$$\{\dot{\lambda}(t)\} = -[A]^T \{\lambda(t)\} - [Q] \{Z(t)\} \quad (4.11)$$

$$\{U(t)\} = -[R]^T [B]^T \{\lambda(t)\} \quad (4.12)$$

Le système d'équations donné par les équations (4.1), (4.11), (4.12) fournit la solution optimale pour $\{Z(t)\}$, $\{U(t)\}$ et $\{\lambda(t)\}$. Ils définissent un problème à deux points limites de valeur puisque $\{Z(t)\}$ est spécifié à l'instant $t = 0$ et $\{\lambda(t)\}$ est spécifié à l'instant $t = t_f$.

a. Contrôle en boucle fermée (Closed-loop)

Lorsque le vecteur de contrôle est régi par le vecteur d'état, on a [59]:

$$\{\lambda(t)\} = [P(t)]\{Z(t)\} \quad (4.13)$$

$[P(t)]$ est la matrice de **Riccati**, pour déterminer cette matrice, dans l'équation (4.13) a introduit les équations (4.1), (4.11) et (4.12), ce qui donne :

$$([\dot{P}(t)] + [P(t)][A] - [P][B][R]^{-1}[B]^T[P(t)] + [A]^T[P(t)] + [Q])\{Z(t)\} + [P(t)]\{E(t)\} = 0 \quad (4.14)$$

Lorsque l'excitation sismique $f(t) = \ddot{x}_0^g(t) = 0$, $\{E(t)\} = 0$ l'équation (4.14) se réduit à l'équation suivante appelée l'équation de la matrice de Riccati (MRE) [13]:

$$-[\dot{P}(t)] = [P(t)][A] + [A]^T[P(t)] - [P][B][R]^{-1}[B]^T[P(t)] + [Q] \quad (4.15)$$

Avec : $[P(t_f)] = [0]$

En remplaçant l'équation (4.12) dans l'équation (4.13) ; on aura :

$$\{U(t)\} = -[R]^T[B]^T[P(t)]\{Z(t)\} \quad (4.16)$$

Où :

$$[G^{ISS}(t)] = -[R]^T[B]^T[P(t)] \quad (4.17)$$

$[G^{ISS}(t)]$: est la matrice de gain de feedback, elle est de dimension $(NCR \times 2 (NO+2))$

Le résultat trouvé par l'équation MRE est dépendant du temps, donc la matrice de gain $[G^{ISS}(t)]$ est aussi dépendante du temps. Mais lorsque $t_f = \infty$, l'équation MRE devient invariable du temps. Par conséquent, la matrice de Riccati $[P(t)]$ reste généralement constante sur l'intervalle de temps du contrôle $[0, t_f]$ pour tomber à zéro rapidement près de t_f , et cela est montré dans la référence [59], La figure 4.10 montre la variation d'un élément dans la matrice de Riccati $[P(t)]$ dans l'intervalle du temps de contrôle. Donc, la matrice $[P(t)]$ est remplacée par une matrice constante $[P]$ et l'équation de Riccati MRE (4.15) se réduit à l'équation algébrique de Riccati ARE suivante [13] :

$$[P][A] - [P][B][R]^{-1}[B]^T[P] + [A]^T[P] + [Q] = 0 \quad (4.18)$$

L'avantage de l'équation algébrique de Riccati ARE par rapport à l'équation MRE est que la matrice de gain $[G^{ISS}(t)]$ devient une matrice constante $[G^{ISS}]$:

$$[G^{ISS}] = -[R]^T[B]^T[P] \quad (4.19)$$

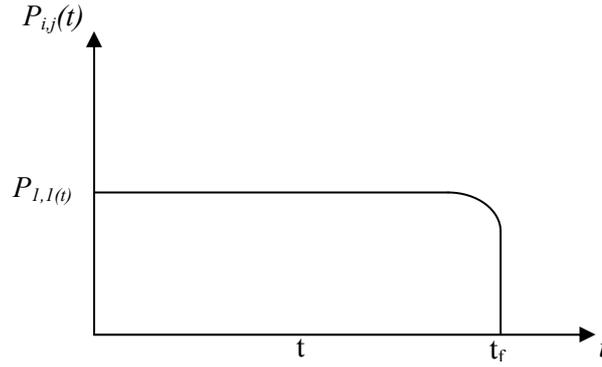


Figure 4.10. Un élément de la matrice de Riccati $[P(t)]$ [59].

b. Contrôle en boucle ouverte-fermée (Closed-Open-loop)

Lorsqu'on a un contrôle en boucle ouverte fermée, l'excitation extérieure $f(t)$ est également accessible à la mesure [59]. Donc, l'équation (4.13) devient :

$$\{\lambda(t)\} = [P(t)]\{Z(t)\} + [S(t)]\{f(t)\} \quad (4.20)$$

Où $[S(t)]$ est la matrice de gain de feedback en boucle ouverte

Maintenant l'équation (4.20) est introduite des équations (4.1), (4.11) et (4.12), ce qui conduit :

$$\begin{aligned} & ([\dot{P}(t)] + [P(t)][A] - [P][B][R]^{-1}[B]^T[P(t)] + [A]^T[P(t)] + [Q])\{Z(t)\} + [P(t)]\{E(t)\} + \\ & [\dot{S}(t)]\{f(t)\} + [S(t)]\{\dot{f}(t)\} - ([P][B][R]^{-1}[B]^T + [A]^T)[S(t)]\{f(t)\} + [P(t)]\{E(t)\} = 0 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Avec : $[P(t_f)] = [0]$ et $[S(t_f)] = [0]$

Et l'équation de la matrice de Riccati (MRE) devient [59]:

$$\begin{aligned} & ([\dot{S}(t)] - ([P][B][R]^{-1}[B]^T - [A]^T)[S(t)] + [P(t)]\{\{E(t)\}/\{f(t)\}\})\{f(t)\} + \\ & [S(t)]\{\dot{f}(t)\} = 0 \end{aligned} \quad (4.22)$$

Malheureusement, la matrice de gain en boucle ouverte $[S(t)]$ ne peut pas être trouvée en général. C'est parce que l'équation (4.22) doit être résolue vers l'arrière du temps final t_f , l'exigence de $f(t)$ et de $\dot{f}(t)$ pendant l'intervalle de contrôle soient connu a priori. Ce n'est pas possible à la plupart des situations structurelles de contrôle.

c. Contrôle en boucle ouverte (Open-loop)

En boucle ouverte, l'équation (4.13) est mise sous la forme suivante [59]:

$$\{\lambda(t)\} = [S(t)]\{f(t)\} \quad (4.23)$$

Où $[S(t)]$ est la matrice de gain de feedback en boucle ouverte.

Maintenant l'équation (4.23) est introduite dans les équations (4.1), (4.11) et (4.12), ce qui conduit :

$$\begin{aligned} & ([\dot{P}(t)] + [P(t)][A] - [P][B][R]^{-1}[B]^T[P(t)] + [A]^T[P(t)] + [Q])\{Z(t)\} + [P(t)]\{E(t)\} + \\ & [\dot{S}(t)]\{f(t)\} + [S(t)]\{\dot{f}(t)\} - ([P][B][R]^{-1}[B]^T + [A]^T)[S(t)]\{f(t)\} + [P(t)]\{E(t)\} = 0 \end{aligned} \quad (4.24)$$

Avec : $[P(t_f)] = [0]$ *et* $[S(t_f)] = [0]$

Et l'équation de la matrice de Riccati (MRE) devient :

$$([\dot{S}(t)] - [A]^T[S(t)])\{f(t)\} + [S(t)]\{\dot{f}(t)\} = 0 \quad (4.25)$$

Il est clair que le même problème que rencontré au contrôle en boucle ouverte-fermé est trouvé au contrôle en boucle ouverte. Donc, même le contrôle en boucle ouverte est ainsi généralement infaisable dans des applications structurelles de contrôle.

4.4.3 Algorithme de contrôle actif optimal instantané IOAC

Yang, Akbarpour et Ghaemmaghami ont adopté la technique de l'algorithme de contrôle actif optimal instantané pour le contrôle structurel contre l'excitation sismique. *Cheng et ses collègues* ont prolongé le même concept à la conception optimum des structures séismiques équipées par des amortisseurs actifs ou des tendons actifs [13].

Cheng et Pantelides ont également appliqué l'algorithme instantané au contrôle optimal des structures excitées par le vent.

Dans l'algorithme de contrôle actif optimal instantané, au lieu de réduire au minimum l'indice de performance comme dans l'algorithme de Riccati, un ordre des processus en une seule étape a été réduit au minimum. Pour de tels essais, on utilise en général l'indice de performance $J(t)$ dépendant du temps défini par [13] :

$$J(t) = \{Z(t)\}^T [Q] \{Z(t)\} + \{U(t)\}^T [R] \{U(t)\} \quad (4.26)$$

Des lois de contrôle optimales sont obtenues par la minimisation de $J(t)$ à chaque fois pour tout instant t tel que $t \in [t_i, t_f]$. Par conséquent, ces lois de contrôle sont désignés sous le nom des algorithmes de contrôle optimal instantanés.

En supposant que la matrice du système en boucle ouverte $[A]$ possède des valeurs propres distinctes, ce système d'équations peut être découplé par la matrice de transformation $[T]$ [59] :

$$\{Z(t)\} = [T]\{\Phi(t)\} \quad (4.27)$$

Avec : $[T]$ est la matrice modale dont les colonnes sont les vecteurs propres de la matrice $[A]$, elle est de dimension $(2(NO+2) \times 2(NO+2))$.

On remplace l'équation (4.27) dans l'équation (4.1) on trouve l'équation dans l'espace d'état suivant :

$$\{\dot{\Phi}(t)\} = [\Lambda]\{\Phi(t)\} + \{\Gamma(t)\} \quad (4.28)$$

Où :

$$[\Lambda] = [T]^{-1}[A][T] \quad (4.29)$$

$[\Lambda]$ est de la forme suivante [7]:

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} [\Lambda_1] & \cdots & [0] & \cdots & [0] \\ \vdots & \ddots & \cdots & \cdots & \cdots \\ [0] & \vdots & [\Lambda_i] & \cdots & [0] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \cdots \\ [0] & \vdots & [0] & \vdots & [\Lambda_{NO+2}] \end{bmatrix}_{2(NO+2) \times 2(NO+2)} \quad (4.30)$$

Tel que :

$$[\Lambda_i] = \begin{bmatrix} \mu_i & \nu_i \\ -\nu_i & \mu_i \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$[\Lambda]$ est une matrice diagonale dont les éléments diagonaux sont les valeurs propres complexes λ_j de la matrice $[A]$ tel que $j = 1, \dots, 2(NO + 2)$:

$$\{\Gamma(t)\} = [T]^{-1}(\{E(t)\} + [B][U(t)]) \quad (4.32)$$

Au-dessus d'un petit décollement d'intervalle, le vecteur d'état « modal » $\{\Phi(t)\}$ peut être exprimé par [59] :

$$\{\Phi(t)\} = \int_{t_i}^{t_f - \Delta t} \exp\{\Lambda(t - \tau)\} \{\Gamma(\tau)\} d\tau + \int_{t_f - \Delta t}^{t_f} \exp\{\Lambda(t - \tau)\} \{\Gamma(\tau)\} d\tau \quad (4.33)$$

$$\{\Phi(t)\} \cong \exp([\Lambda]\Delta t) \{\Phi(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} [\exp\{[\Lambda]\Delta t\} \{\Gamma(t - \Delta t)\} + \{\Gamma(t)\}] \quad (4.34)$$

D'après les équations (4.27), (4.32) et (4.34) le vecteur d'état $\{Z(t)\}$ est de la forme suivante :

$$\{Z(t)\} = [T]\{\nabla(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} (\{E(t)\} + [B][U(t)]) \quad (4.35)$$

Tel que :

$$\{\nabla(t - \Delta t)\} = [\exp([\Lambda]\Delta t)][T]^{-1} \left(\{Z(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} (\{E(t - \Delta t)\} + [B][U(t - \Delta t)]) \right) \quad (4.36)$$

$[\exp([\Lambda]\Delta t)]$ est une matrice diagonale avec l'i-ème élément de diagonale étant $[\exp([\Lambda_i]t)]$. Où [7] :

$$[\exp([\Lambda]t)] = \begin{bmatrix} [\exp([\Lambda_1]t)] & [0] & [0] \\ [0] & [\exp([\Lambda_i]t)] & [0] \\ [0] & [0] & [\exp([\Lambda_{No+2}]t)] \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Avec :

$$[\exp([\Lambda_i]t)] = \exp(\mu_i t) \begin{bmatrix} \cos(v_i t) & \sin(v_i t) \\ -\sin(v_i t) & \cos(v_i t) \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Dans ce cas, l'Hamiltonien \mathcal{H} est :

$$\mathcal{H} = \{Z(t)\}^T [Q]\{Z(t)\} + \{U(t)\}^T [R]\{U(t)\} + \{\lambda(t)\}^T \left\{ \{Z(t)\} - [T]\{\nabla(t - \Delta t)\} - \frac{\Delta t}{2} (\{E(t)\} + [B][U(t)]) \right\} \quad (4.39)$$

Avec :

$\{\lambda(t)\}$: est le multiplicateur de Lagrange.

Les conditions nécessaires pour la minimisation sont :

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial Z} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial U} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \lambda} = 0$$

Ce qui rapporte :

$$\begin{cases} 2[Q]\{Z(t)\} + \{\lambda(t)\} = 0 \\ 2[R]\{U(t)\} - \frac{\Delta t}{2} [B]^T \{\lambda(t)\} = 0 \\ \{Z(t)\} = [T]\{\nabla(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} (\{E(t)\} + [B][U(t)]) \end{cases} \quad (4.40)$$

a. Contrôle en boucle fermée (Closed-loop)

Lorsque le vecteur de contrôle $[U(t)]$ est régi par le vecteur d'état $\{Z(t)\}$. On a [59]:

$$\{\lambda(t)\} = [P(t)]\{Z(t)\} \quad (4.41)$$

On a:

$$2[Q]\{Z(t)\} + \{\lambda(t)\} = 0 \quad \Rightarrow \quad 2[Q]\{Z(t)\} = \{\lambda(t)\}$$

Donc :

$$[P(t)] = -2[Q] \quad (4.42)$$

Et d'après le 2ème équation de l'équation (4.40), on a :

$$\{U(t)\} = - \underbrace{\frac{\Delta t}{2} [R]^{-1} [B]^T [Q]}_{[G^{ISS}]} \{Z(t)\} \quad (4.43)$$

$$[G^{ISS}] = - \frac{\Delta t}{2} [R]^{-1} [B]^T [Q]$$

En remplaçant l'équation (4.43) dans l'équation (4.35), on trouve :

$$\{Z(t)\} = [T]\{\nabla(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} \left(\{E(t)\} - [B] \frac{\Delta t}{2} [R]^{-1} [B]^T [Q] \{Z(t)\} \right) \quad (4.44)$$

En résolvant l'équation (4.44) on trouve le vecteur d'état $\{Z(t)\}$:

$$\{Z(t)\} = \left[[T]\{\nabla(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} \{E(t)\} \right] \left[I + \frac{\Delta t^2}{4} [B][R]^{-1}[B]^T[Q] \right]^{-1} \quad (4.45)$$

D'après l'équation (4.16) de l'algorithme de Riccati et l'équation (4.43) d'IOAC, nous voyons que la matrice $[Q]$ joue le rôle de la matrice de Riccati $[P(t)]$. Ce qui implique que la conception de IOAC est plus simple de ROAC, car il ne nécessite pas une solution de l'équation de la matrice de Riccati.

b. Contrôle en boucle ouverte-fermée (Closed-Open-loop)

Lorsque le vecteur de contrôle est régi par le vecteur d'état et d'excitation externe, le multiplicateur de Lagrange est de la forme [59] :

$$\{\lambda(t)\} = [P]\{Z(t)\} + [O(t)] \quad (4.46)$$

Où $[O(t)]$ représente la matrice de contrôle en boucle ouverte.

En remplace la deuxième équation de l'équation (4.40) dans la troisième équation de l'équation (4.40), on trouve :

$$\{Z(t)\} = [T]\{\nabla(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} \left(\{E(t)\} + \frac{\Delta t}{4} [B][R]^{-1}[B]^T \{\lambda(t)\} \right) \quad (4.47)$$

D'après l'équation (4.40) on a :

$$2[Q]\{Z(t)\} + \{\lambda(t)\} = 0 \Rightarrow \{\lambda(t)\} = -2[Q]\{Z(t)\}$$

$$\Rightarrow \{\lambda(t)\} = -[Q] (\{Z(t)\} + \{Z(t)\}) \quad (4.48)$$

Tel que : $2\{Z(t)\}$ concerne deux parties, une concerne le contrôle en boucle ouverte et l'autre concerne le contrôle en boucle fermé. En utilisant l'équation (4.47) pour le deuxième terme de $\{Z(t)\}$, on a donc :

$$\{\lambda(t)\} = -[Q] \left(\{Z(t)\} + [T]\{\nabla(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} \left(\{E(t)\} + \frac{\Delta t}{4} [B][R]^{-1}[B]^T \{\lambda(t)\} \right) \right) \quad (4.49)$$

En remplaçant l'équation (4.46) dans l'équation (4.49) on trouve :

$$[P]\{Z(t)\} + [O(t)] = -[Q] \left(\{Z(t)\} + [T]\{\nabla(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} \left(\{E(t)\} + \frac{\Delta t}{4} [B][R]^{-1}[B]^T \{\lambda(t)\} \right) \right)$$

⇒

$$\left[[Q] + \left([I] + \frac{\Delta t^2}{8} [Q][B][R]^{-1}[B]^T \right) [P] \right] \{Z(t)\} + [Q] \left[[T]\{\nabla(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} \{E(t)\} \right] + \left(\frac{\Delta t^2}{8} [Q][B][R]^{-1}[B]^T \right) [O(t)] = 0 \quad (4.50)$$

La solution pour les quantités inconnues $[P]$ et $[O(t)]$ peut être trouvée à partir de l'équation (4.50). Puisque $\{Z(t)\} \neq 0$ et $[O(t)] \neq 0$, les résultats souhaités sont les suivants :

$$[P] = - \left([I] + \frac{\Delta t^2}{8} [Q][B][R]^{-1}[B]^T \right)^{-1} [Q] \quad (4.51)$$

$$[O(t)] = [P] \left[[T]\{\nabla(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} \{E(t)\} \right] \quad (4.52)$$

Le remplacement des équations (4.51) et (4.52) dans l'équation (4.46) produit la loi de contrôle en boucle ouverte-fermée.

Le vecteur d'état $\{Z(t)\}$ de contrôle en boucle fermée est donné par :

$$\{Z(t)\} = \left([I] + \frac{\Delta t^2}{8} [B][R]^{-1}[B]^T [P] \right)^{-1} \left[[T]\{\nabla(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t^2}{8} [B][R]^{-1}[B]^T [O(t)] + \frac{\Delta t}{2} \{E(t)\} \right] \quad (4.53)$$

c. Contrôle en boucle ouverte (Open-loop)

Pour le contrôle de boucle ouverte, $\{\lambda(t)\}$ peut être tout simplement sous la forme [59] :

$$\{\lambda(t)\} = [O(t)] \quad (4.54)$$

Après une même procédure de celle décrite pour le contrôle en boucle ouverte-fermée, on obtient :

$$\{U(t)\} = - \frac{\Delta t}{2} \left([R] + \frac{\Delta t^2}{4} [B]^T [Q][B] \right)^{-1} [B]^T [Q] \quad (4.55)$$

Et pour le vecteur d'état on a :

$$\{Z(t)\} = \left[[I] - \frac{\Delta t^2}{4} [B] \left(\frac{\Delta t^2}{4} [B]^T [Q] [B] + [R] \right)^{-1} [B]^T [Q] \right] \left[[T] \{V(t - \Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} \{E(t)\} \right] \quad (4.56)$$

4.4.4 Algorithme du contrôle actif optimal généralisé GOAC

La nouvelle technique appelée algorithme optimale généralisé de contrôle actif (GOAC) est présentée pour combler les défauts de ROAC et IOAC. Dans cette partie on va étudier en détail l'algorithme GOAC pour le contrôle structurel en boucle fermée (*Closed-loop*) [7].

a. Les conditions de transversalité :

Considérons un système régi par des conditions d'extrémité libre avec l'équation (4.1) donnés par [11] :

$$\begin{cases} t_{i-1} = t_0 + (i-1)\Delta t \\ \{Z(t_{i-1})\} = \{Z_{i-1}\} \\ t_i = t_0 + (i)\Delta t \end{cases} \quad (4.57)$$

Tel que :

$$\Delta t = \frac{1}{N} (t_f - t_0); \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$\{Z_{i-1}\}$: est la valeur de $\{Z(t)\}$ a t_{i-1} , vecteur de dimension $(2(\text{NO}+2) \times 2(\text{NO}+2))$

L'équation (4.57) peut être écrite sous la forme vectorielle suivante :

$$\{\Omega\} = \begin{Bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (t_{i-1} - t_0) - (i-1)\Delta t \\ \{Z(t_{i-1})\} - \{Z_{i-1}\} \\ (t_i - t_0) - (i)\Delta t \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (4.58)$$

En introduisant des multiplicateurs $\{\mu\}$ et $\{\lambda(t)\}$ et formant:

$$G = g(\{Z(t_i)\}) + \{\mu\}^T \{\Omega\} \quad (4.59)$$

$$F = \bar{f}(t) - \{\lambda(t)\}^T \{f(t)\} \quad (4.60)$$

Tel que :

$$g(\{Z(t_i)\}) = \frac{1}{2} \{Z(t_i)\}^T [S] \{Z(t_i)\} \quad (4.61)$$

$$\bar{f}(t) = \{Z(t)\}^T [Q] \{Z(t)\} + \{U(t)\}^T [R] \{U(t)\} \quad (4.62)$$

$$\{f(t)\} = \frac{1}{2} ([A] \{Z(t)\} + [B] \{U(t)\} + \{E(t)\} - \{\dot{Z}(t)\}) \quad (4.63)$$

Alors la condition de transversalité peut être exprimée comme suit :

$$dG - \left[\left(\left\{ \frac{\partial F}{\partial \dot{Z}(t)} \right\}^T \dot{Z}(t) - F \right) dt \right]_{t_{i-1}}^{t_i} + \left[\left\{ \frac{\partial F}{\partial Z(t)} \right\}^T d\{Z(t)\} \right]_{t_{i-1}}^{t_i} = 0 \quad (4.64)$$

Appliquant l'équation (4.64) à l'équation (4.59) et (4.60), on obtient :

$$[S]\{Z(t_i)\} - \{\lambda(t_i)\} = \{0\} \quad (4.65)$$

Où : $g(\{Z(t_i)\})$ est une fonction d'optimisation des conditions au limites à chaque instant d'extrémité t_i .

$[S]$ et $[Q]$ sont des matrices semi-définie positives, elles sont de dimension de $(2(\text{NO}+2) \times 2(\text{NO}+2))$. $[R]$ est une matrice définie positive, elle est de dimension $(\text{NCR} \times \text{NCR})$.

b. Indice de performance généralisé :

Dans cet algorithme, l'intervalle de temps du contrôle $[t_0, t_f]$ est divisé en N segment dans le calcul de l'indice de performance J qui est défini et réduit au minimum, pour obtenir une solution optimale pour le vecteur d'état $\{Z(t)\}$ et le vecteur de la force de contrôle $\{U(t)\}$. Donc l'équation (4.3) devient [7] :

$$J = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \int_{t_{i-1}}^{t_i} (\{Z(t)\}^T [Q] \{Z(t)\} + \{U(t)\}^T [R] \{U(t)\}) dt \quad (4.66)$$

Les conditions aux limites dans l'équation de l'indice de performance dans l'algorithme de Riccati (4.3) sont les suivantes :

$$\begin{cases} \{Z(t_0)\} = \{Z(t_f)\} = \{0\} \\ \{U(t_0)\} = \{U(t_f)\} = \{0\} \end{cases} \quad (4.67)$$

L'indice de performance J sera intégré étape par étape. A chaque étape d'intégration de $[t_{i-1}, t_i]$ tel que ($i = 1, 2, \dots, N$), au moins une des deux valeurs limites du vecteur d'état est inconnue. Les valeurs du vecteur d'état $\{Z(t)\}$ est spécifié à t_{i-1} , et non spécifié et mobile à l'instant t_i . La figure 4.11 montre qu'il y a plusieurs valeurs de la fonction f à l'instant t_i et une valeur à l'instant t_{i-1} , et pour résoudre ce problème on utilise l'équation d'Euler pour trouver la valeur optimum de la fonction f .

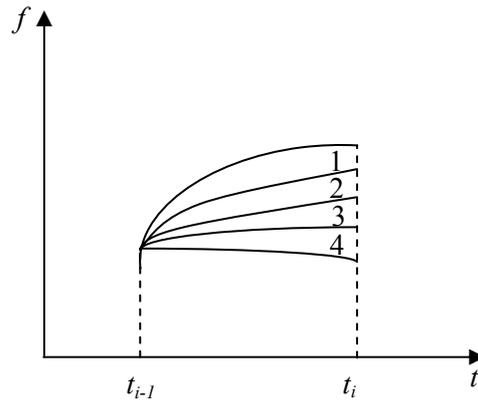


Figure 4.11. La variation de la fonction f à l'intervalle $[t_{i-1}, t_i]$.

On a déjà dit que le vecteur d'état $\{Z(t_i)\}$ est inconnu, il faut réduire au minimum pour inclure à l'équation de l'indice de performance. En introduisant les conditions transversales à l'instant t_f , alors l'indice de performance est exprimé par :

$$J_i = g(\{Z(t_i)\}) + \frac{1}{2} \int_{t_{i-1}}^{t_i} (\{Z(t)\}^T [Q] \{Z(t)\} + \{U(t)\}^T [R] \{U(t)\}) dt \quad (4.68)$$

Donc :

$$J_i = g(\{Z(t_i)\}) + \frac{1}{2} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \bar{f}(t) dt \quad (4.69)$$

c. La matrice de gain de rétroaction et la force de contrôle

Les équations d'Euler :

$$\begin{cases} \frac{\partial F(t)}{\partial \{Z(t)\}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F(t)}{\partial \dot{\{Z(t)\}}} \right) = \{0\} \\ \frac{\partial F(t)}{\partial \{U(t)\}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F(t)}{\partial \dot{\{U(t)\}}} \right) = \{0\} \end{cases} \quad (4.70)$$

Remplacer l'équation (4.60) dans l'équation (4.70), on aura :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \{Z(t)\}} \left[\frac{1}{2} \{Z(t)\}^T [Q] \{Z(t)\} \right] = [Q] \{Z(t)\} \\ \frac{\partial}{\partial \{Z(t)\}} [\{\lambda(t)\}^T [A] \{Z(t)\}] = [A]^T \{\lambda(t)\} \\ \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\{Z(t)\}}} (-\{\lambda(t)\}^T \dot{\{Z(t)\}}) \right] = -\{\lambda(t)\} \\ \frac{\partial}{\partial \{U(t)\}} (\{U(t)\}^T [R] \{U(t)\}) = [R] \{U(t)\} \\ \frac{\partial}{\partial \{U(t)\}} (\{\lambda(t)\}^T [B] \{U(t)\}) = [B]^T \{\lambda(t)\} \end{cases} \quad (4.71)$$

Donc l'équation (4.70) devient :

$$\begin{cases} [Q]\{Z(t)\} + [A]^T\{\lambda(t)\} + \{\dot{\lambda}(t)\} = \{0\} \\ [R]\{U(t)\} + [B]^T\{\lambda(t)\} = \{0\} \end{cases} \quad (4.72)$$

En remplaçant les équations (4.61) et (4.58) dans l'équation (4.59), on trouve la fonction G :

$$G = \frac{1}{2}\{Z(t_i)\}^T[S]\{Z(t_i)\} + \mu_1[(t_{i-1} - t_0) - (i-1)\Delta t] + \{\mu_2\}^T[\{Z(t_{i-1})\} - \{Z_{i-1}\}] + \mu_3[(t_i - t_0) - (i)\Delta t] \quad (4.73)$$

Où G est la fonction augmentée de la fonction g .

Tel que le multiplicateur $\{\mu\}^T = [\mu_1, \{\mu_2\}^T, \mu_3]$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \frac{\partial G}{\partial t_{i-1}} = \mu_1 \\ \frac{\partial G}{\partial \{Z(t_{i-1})\}} = \{\mu_2\} \\ \frac{\partial G}{\partial t_i} = \mu_3 \\ \left\{ \frac{\partial G}{\partial \{Z(t_i)\}} \right\} = [S]\{Z(t_i)\} \end{cases} \quad (4.74)$$

À partir de la deuxième équation de l'équation (4.72), on a l'équation de la force de contrôle :

$$\{U(t)\} = -[R]^{-1}[B]^T\{\lambda(t)\} \quad (4.75)$$

$$\Rightarrow \{U(t)\} = -[R]^{-1}[B]^T[S]\{Z(t)\} \quad (4.76)$$

$$\{U(t)\} = [G^{ISS}]\{Z(t)\} \quad (4.77)$$

Donc :

$$[G^{ISS}] = -[R]^{-1}[B]^T[S] \quad (4.78)$$

Où $[G]$ est la matrice de gain de feedback, cette matrice est une loi de contrôle optimale, elle est de dimension $(NCR \times 2(NO+2))$. Elle est indépendante de temps t , où $t \in [t_{i-1}, t_i]$ et de l'incrément du temps Δt .

A partir de l'équation (4.78) on remarque que si on a choisit la matrice $[S] = [P]$, tel que $[P]$ est la matrice de Riccati, on trouve la même équation (4.17) de la matrice de gain de rétroaction trouvé dans l'algorithme de Riccati c.-à-d. que l'algorithme de Riccati est un cas de l'algorithme GOAC, c'est pour ça l'algorithme est appelé l'algorithme généralisé GOAC. Cette matrice de gain $[G^{ISS}]$ est obtenue à partir de l'équation d'état (4.1) qui peut être résolue par le diagramme de la figure suivante.

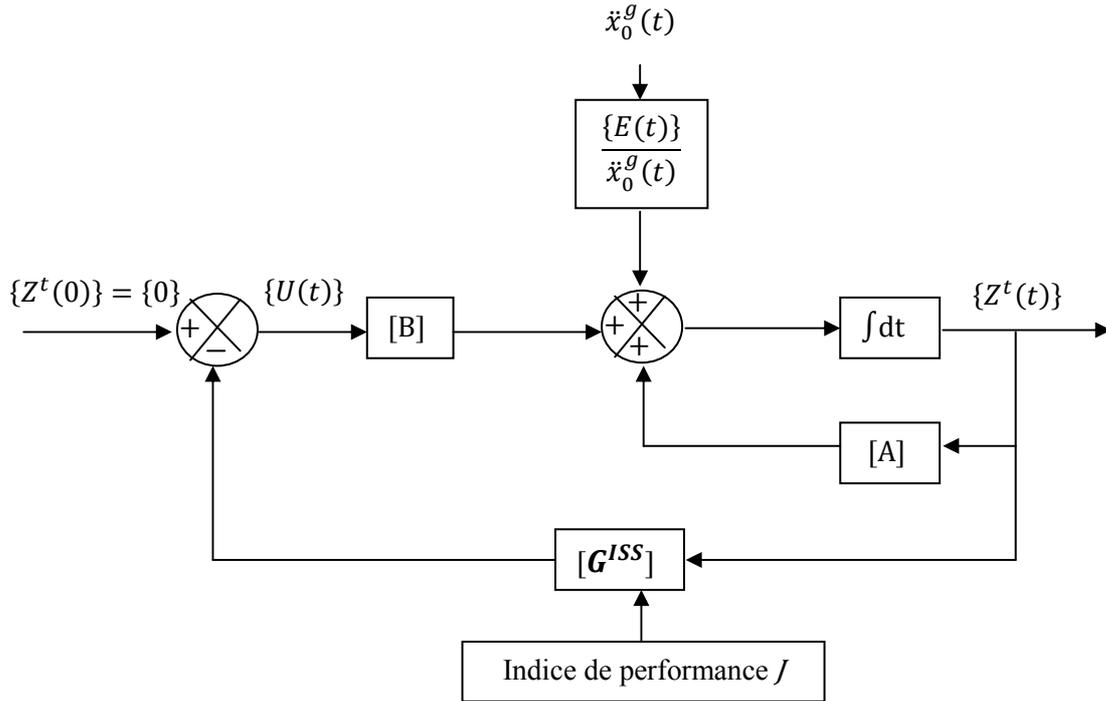


Figure 4.12. Organigramme de la résolution de l'équation d'état avec le contrôle actif.

4.4.5 Les matrices de pondération de ROAC, IOAC et GOAC

Dans le cas d'ISS, les matrices $[S]$ et $[Q]$ sont de dimension $(2(\text{NO}+2) \times 2(\text{NO}+2))$. La matrice $[R]$ est de dimension $(\text{NCR} \times \text{NCR})$. Elles sont définies comme suit :

$$[Q] = \begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{S0}] & [0] & [0] \\ [K_{S0}]^T & [\tilde{K}_{00}] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [M_{SS}] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [M_{00}] \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

Et

$$[R] = \begin{bmatrix} [\gamma_S] \\ [\gamma_0] \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{S0}] \\ [K_{S0}]^T & [\tilde{K}_{00}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [\gamma_S] \\ [\gamma_0] \end{bmatrix} \quad (4.80)$$

Avec :

$$[\tilde{K}_{00}] = \begin{bmatrix} k_1 + \tilde{K}_{xx} & -h_{a1}k_1 + \tilde{K}_{x\theta} \\ -h_{a1}k_1 + \tilde{K}_{\theta x} & h_{a1}^2k_1 + \tilde{K}_{\theta\theta} \end{bmatrix}^{-1} \quad (4.81)$$

Les matrices $[K_{SS}]$, $[K_{S0}]$, $[M_{SS}]$, $[M_{00}]$, $[\gamma_S]$ et $[\gamma_0]$ sont définis dans la section 3.1.4.

La matrice $[S]$ est choisie en tant que matrice ligne arbitraire :

$$[S] = \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [S_D] & [S_V] \end{bmatrix} \quad (4.82)$$

Pour assurer un état semi-défini positif de la matrice $[S]$, la matrice symétrique peut être choisie comme suit:

$$[S] = \gamma_D \begin{bmatrix} \Omega_V^{-1}[\tilde{K}] & [\tilde{K}] \\ [\tilde{K}] & \Omega_V[\tilde{K}] \end{bmatrix} \quad (4.83)$$

Avec :

$$[\tilde{K}] = \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{s0}] \\ [K_{s0}]^T & [\tilde{K}_{00}] \end{bmatrix} \quad (4.84)$$

Où γ_D est le facteur d'échelle de rigidité, et Ω_V est le facteur d'échelle d'amortissement.

L'influence de S_D , S_V , et γ_D , Ω_V sur l'ensemble du système peut être étudiée en substituant l'équation de la matrice de gain de l'équation (4.78) dans l'équation de la matrice de la composante horizontale de la force d'amortissement (3.87), alors on obtient :

$$[D] = [A] - \frac{1}{R}[B][B]^T[S] \quad (4.85)$$

4.4.6 La solution technique

$$[\vec{U}(t)] = [G^{ISS}]\{Z^t(t)\}$$

$[G^{ISS}]$ est la matrice de gain de rétroaction (feedback), elle est indépendante du temps, et elle est de dimension $(NCR \times 2(NO+2))$.

On peut écrire l'équation (3.86) comme suit :

$$\{\dot{Z}^{tg}(t)\} = [D]\{Z^{tg}(t)\} + \{E(t)\} \quad (4.86)$$

Où $[D]$ est la matrice de la composante horizontale de la force d'amortissement, et elle est de dimension $(2(NO+2) \times 2(NO+2))$:

$$[D] = [A] + [B][G^{ISS}] \quad (4.87)$$

$\{E\}$ est le vecteurs de perturbations externes, il est de dimension $(2(NO+2) \times 1)$:

$$\{E(t)\} = \{C\}\ddot{x}_0^g(t) + \{-\check{R}_0(t - \Delta t)\} \quad (4.88)$$

La simplification de l'équation (4.1) est comme suit :

$$\{\dot{Z}(t)\} = [D]\{Z(t)\} + \{E(t)\} \quad (4.89)$$

$$[T] = [\{a_1\}\{b_1\}; \dots; \{a_i\}\{b_i\}; \dots; \{a_{NO+2}\}\{b_{NO+2}\}] \quad (4.90)$$

La matrice de transformation $[T]$ est construite à partir des vecteurs propres de la matrice $[A]$. Elle est nécessaire pour transformer l'équation d'état sous forme canonique. Dans lequel $\{a_i\}$ et $\{b_i\}$ sont respectivement les parties réelle et imaginaire du vecteur propre i de la matrice $[A]$, et elles sont de dimensions $(2(NO+2) \times 1)$. Donc La matrice de transformation $[T]$ est de dimension $(2(NO+2) \times 2(NO+2))$.

$$[\Lambda] = [T]^{-1}[D][T] \quad (4.91)$$

$[\Lambda]$ est une matrice réelle, elle est de dimension $(2(NO+2) \times 2(NO+2))$, et elle est de la forme suivante :

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} [\Lambda_1] & \cdots & [0] & \cdots & [0] \\ \vdots & \ddots & \cdots & \cdots & \cdots \\ [0] & \vdots & [\Lambda_i] & \cdots & [0] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \cdots \\ [0] & \vdots & [0] & \vdots & [\Lambda_{NO+2}] \end{bmatrix} \quad (4.92)$$

Avec :

$$[\Lambda_i] = \begin{bmatrix} \mu_i & \nu_i \\ -\nu_i & \mu_i \end{bmatrix} \quad (4.93)$$

La solution de l'équation (4.89) est exprimée comme suit :

$$\{Z(t)\} = [T]\{\Phi(t)\} \quad (4.94)$$

On remplace (4.91) et (4.94) dans (4.89) on trouve :

$$[T]\{\dot{\Phi}(t)\} = [D][T]\{\Phi(t)\} + \{E(t)\} \quad (4.95)$$

$$\{\dot{\Phi}(t)\} = [T]^{-1}[D][T]\{\Phi(t)\} + [T]^{-1}\{E(t)\} \quad (4.96)$$

$$\{\dot{\Phi}(t)\} = [\Lambda]\{\Phi(t)\} + \{\Gamma(t)\} \quad (4.97)$$

Avec :

$$\{\Gamma(t)\} = [T]^{-1}\{E(t)\} \quad (4.98)$$

$$\{Z(0)\} = \{0\} \Rightarrow \{\Phi(0)\} = 0 \quad (4.99)$$

$$\ddot{x}_0^g(0) = 0, \{R_0(0)\} = \{0\} \quad (4.100)$$

$$\{\Gamma(0)\} = \{0\} \quad (4.101)$$

$$\{\dot{\Phi}(t)\} - [\Lambda]\{\Phi(t)\} = \{\Gamma(t)\} \quad (4.102)$$

$$\{\Phi(t)\} = [\exp([\Lambda]t)]\{\Phi(0)\} + [\exp([\Lambda]t)] \int_0^t [\exp(-[\Lambda]\tau)] \{\Gamma(\tau)\} d\tau \quad (4.103)$$

$$= [\exp([\Lambda]t)]\{\Phi(0)\} + \int_0^t [\exp([\Lambda](t - \tau))] \{\Gamma(\tau)\} d\tau \quad (4.104)$$

$$[\exp([\Lambda]t)] = \begin{bmatrix} [\exp([\Lambda_1]t)] & [0] & [0] \\ [0] & [\exp([\Lambda_i]t)] & [0] \\ [0] & [0] & [\exp([\Lambda_{NO+2}]t)] \end{bmatrix} \quad (4.105)$$

Avec :

$$[\exp([\Lambda_i]t)] = \exp(\mu_i t) \begin{bmatrix} \cos(v_i t) & \sin(v_i t) \\ -\sin(v_i t) & \cos(v_i t) \end{bmatrix} \quad (4.106)$$

$$\{\Phi(n\Delta t)\} = [\exp([\Lambda]n\Delta t)]\{\Phi(0)\} + \frac{\Delta t}{2} [\exp([\Lambda]n\Delta t)]\{\Gamma(0)\} + \Delta t \sum_{m=1}^{n-1} [\exp([\Lambda](n-m)\Delta t)]\{\Gamma(m\Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} \{\Gamma(n\Delta t)\} \quad (4.107)$$

$$\{\Phi(n\Delta t)\} = \Delta t \sum_{m=1}^{n-1} [\exp([\Lambda](n-m)\Delta t)]\{\Gamma(m\Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} \{\Gamma(n\Delta t)\} \quad (4.108)$$

$$\{\Phi(n\Delta t)\} = \{\Pi((n-1)\Delta t)\} + \frac{\Delta t}{2} \{\Gamma(n\Delta t)\} \quad (4.109)$$

$$\{\Pi((n-1)\Delta t)\} = \Delta t \sum_{m=1}^{n-1} [\exp([\Lambda](n-m)\Delta t)]\{\Gamma(m\Delta t)\} \quad (4.110)$$

$$\{\Pi((n-1)\Delta t)\} = [\exp([\Lambda]\Delta t)]\{\Pi((n-2)\Delta t)\} + \Delta t \{\Gamma((n-1)\Delta t)\} \quad (4.111)$$

Remarque : La résolution de l'équation d'état (4.1) est utilisée aussi pour le cas sans contrôle en annulant le terme de contrôle [B], soit :

$$\{\dot{Z}^{tg}(t)\} = [A]\{Z^{tg}(t)\} + \{E(t)\} \quad (4.112)$$

4.5 Conclusion

Ce chapitre donne un aperçu général sur la stratégie et les algorithmes de contrôle actif, pour avoir une vision plus large et plus approfondie du développement et des formulations mathématiques concernant les algorithmes de contrôle actif structurel dans le génie civil.

En effet, les algorithmes de contrôle ne sont qu'un élément ou un outil utilisé pour calculer et comprendre l'effet du contrôle dans la structure, et c'est ça ce qu'on va faire dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 05

Simulation numérique

5.1 Introduction

Les trois algorithmes de contrôle actif présentés dans le chapitre 4 ainsi que l'effet de l'ISS présenté dans le chapitre 3 ont été programmés en utilisant MATLAB.

Nous allons d'abord décrire le programme élaboré, puis l'appliquer pour de structures courantes afin de montrer l'importance du contrôle actif et l'ISS.

Après validation des résultats, une étude paramétrique est menée afin d'étudier l'influences de certains paramètres clés.

5.2 Programme élaboré

5.2.1 Description

Ainsi, à la base du développement théorique, une simulation numérique est faite en utilisant MATLAB où un programme a été élaboré.

Ce programme permet d'étudier le comportement dynamique des structures intelligentes de type poteau-poutre pour n'importe quel nombre d'étage et de tendon actif.

On peut traiter le cas sans ISS (encastrement parfait) et celui avec ISS et ceci avec ou sans contrôle.

Trois types d'algorithmes de contrôle actif sont introduits dans le programme ROAC, IOAC et GOAC par rétroaction en boucle fermée.

L'organigramme général de ce programme est illustré dans la figure suivante.

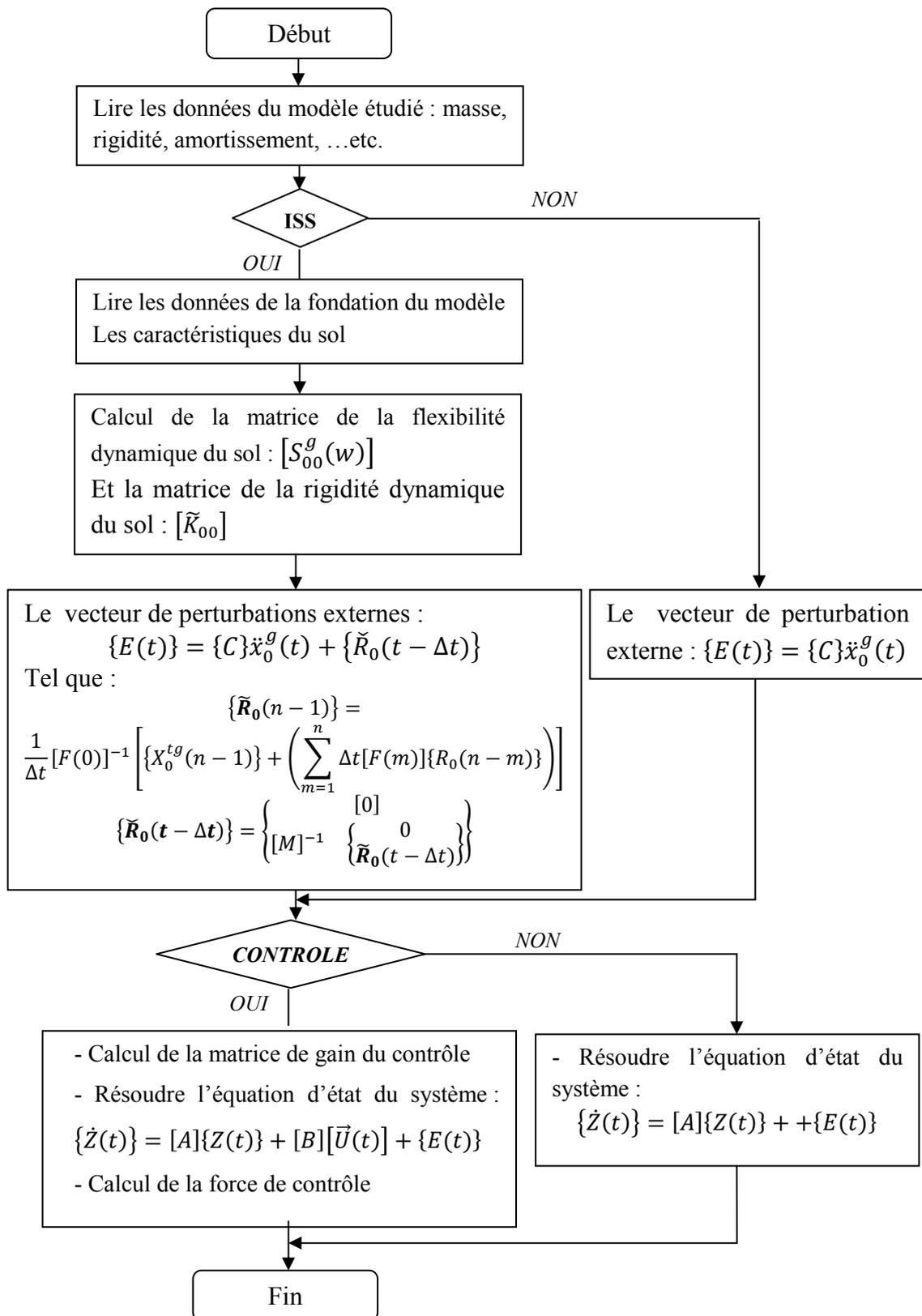


Figure 5.1. L'organigramme de la simulation.

5.2.2 Validation du programme

Dans cette section, on va essayer de valider notre programme à travers des exemples simples trouvés dans la littérature.

Pour cela et pour l'application numérique, le chargement dynamique utilisé pour l'excitation des structures (bâtiment) est le séisme d'El-Centro 1940 de composantes N-S (Figure 5.2).

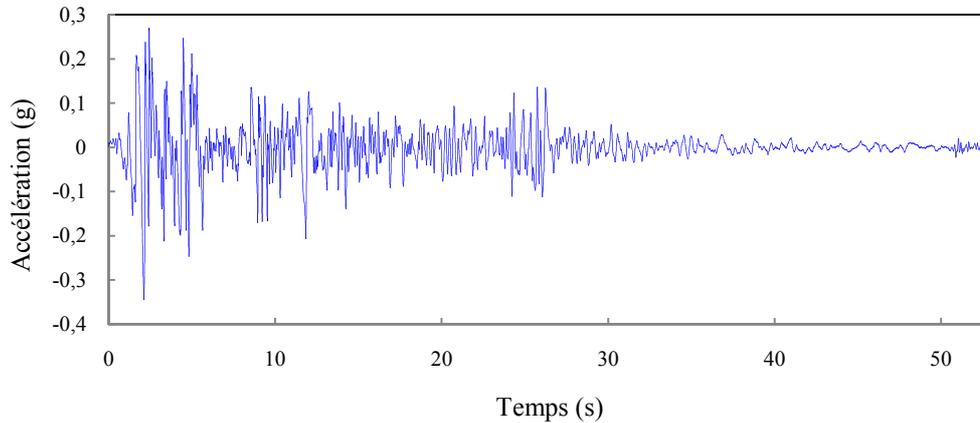


Figure 5.2. El-Centro 1940 du composantes N-S.

a) Cas sans ISS

i. Sans contrôle

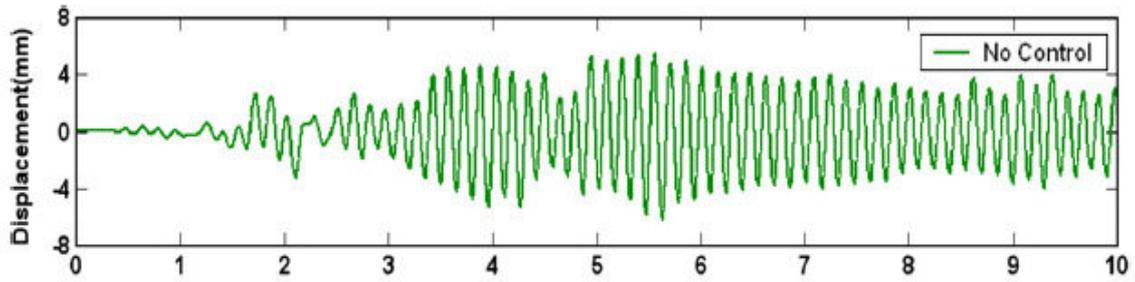
Un modèle à 02 étages tiré de la référence [15] va être utilisé pour comparer les résultats trouvés par notre programme.

Cet exemple a été traité sans contrôle et sans interaction sol-structure (structure encastree au sol).

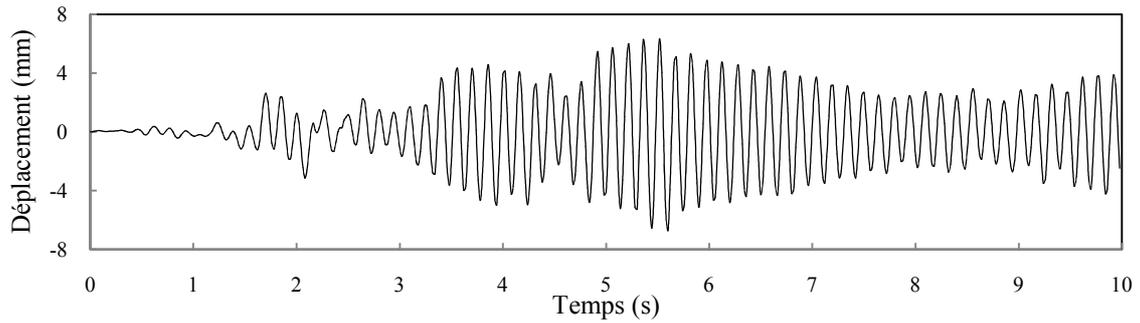
Les données de l'exemple sont :

Masses	$m_1 = 376.8 \text{ kg}$
	$m_2 = 440.8 \text{ kg}$
Rigidités	$k_1 = 1906.3 \text{ kN/m}$
	$k_2 = 1906.3 \text{ kN/m}$
Amortissements	$C_1 = 600 \text{ Ns/m}$
	$C_2 = 10 \text{ Ns/m}$

Les résultats de déplacements obtenus par notre programme sont donnés sur la figure 5.3.b alors que ceux de la littérature sont dans la figure 5.3.a.



a) Suivant la référence [15].



b) Suivant notre programme.

Figure 5.3. Le déplacement du premier étage sans contrôle a) suivant la référence [15] et b) suivant notre programme.

Une grande concordance entre les variations des déplacements est constatée de la figure 5.3.

Toujours pour rester sur le cas sans contrôle, un autre modèle de 11 étages tiré de la référence [21] a été analysé par notre programme.

Les données de l'exemple sont résumés dans le tableau (5.1) suivant :

Tableau 5.1. Les caractéristiques du modèle [21].

Storey	Mass (kg) $\times 10^5$	Stiffness (N/m) $\times 10^8$
1	2.15	4.68
2	2.01	4.76
3	2.01	4.68
4	2	4.5
5	2.01	4.5
6	2.01	4.5
7	2.01	4.5
8	2.03	4.37
9	2.03	4.37
10	2.03	4.37
11	1.76	3.12

Les résultats des déplacements maximaux obtenus par notre programme sont reportés sur le tableau 5.2 et sont comparés aux résultats de la référence [21].

On remarque clairement la bonne concordance des deux résultats.

Tableau 5.2. Les déplacements maximums (cm) des étages du modèle étudié par la référence [21] et par notre programme.

Etages	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Référence [21]	2.24	5.8	6.27	8.12	9.73	11.12	12.49	13.73	14.77	15.49	15.98
Notre programme	2.28	5.27	6.57	8.56	10.32	11.85	15.21	15.6	14.96	15.57	15.91

ii. Avec contrôle

Pour valider les résultats de ces deux algorithmes on va comparer avec les résultats trouvés par Cheng dans son livre [7], le modèle étudié est un bâtiment de six étages contrôlé par un système actif de type tendon actif placé au premier étage, ses caractéristiques sont données sur la figure suivante, tel que les matrices [Q] et [S] sont formées par les premières rangées de [Q₂₁], [Q₂₂], [S₂₁] et [S₂₂], avec : $(Q_{21})_{ij}/R=(Q_{22})_{ij}/R=1.2 \times 10^8$ pour IOAC et $(S_{21})_{ij}/R=(S_{22})_{ij}/R=6.0 \times 10^8$ pour GOAC :

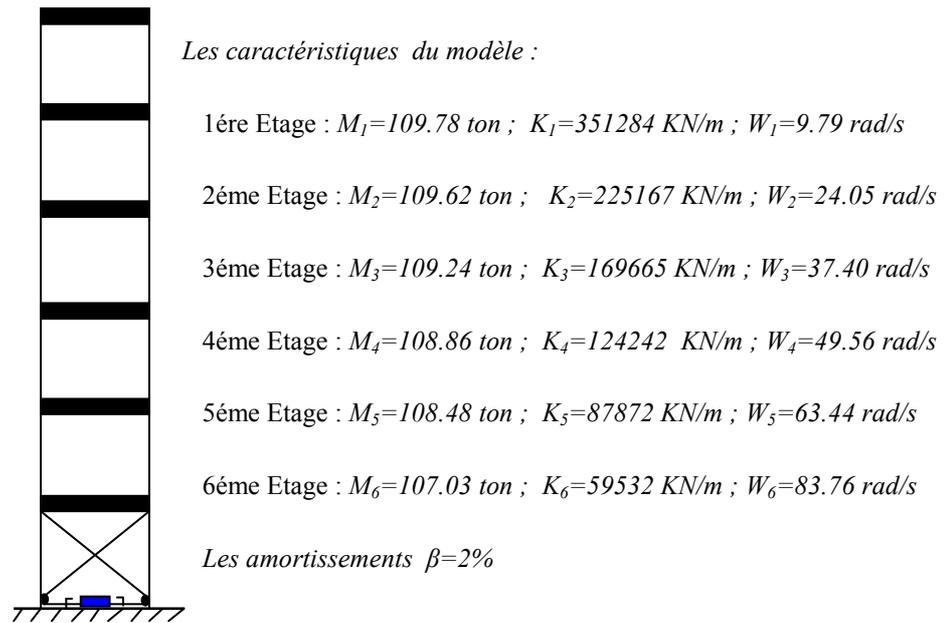


Figure 5.4. Les caractéristiques du modèle étudié avec contrôle [7].

La figure suivante donne la comparaison entre le déplacement au sommet trouvé par Cheng [7] et celui de notre programme.

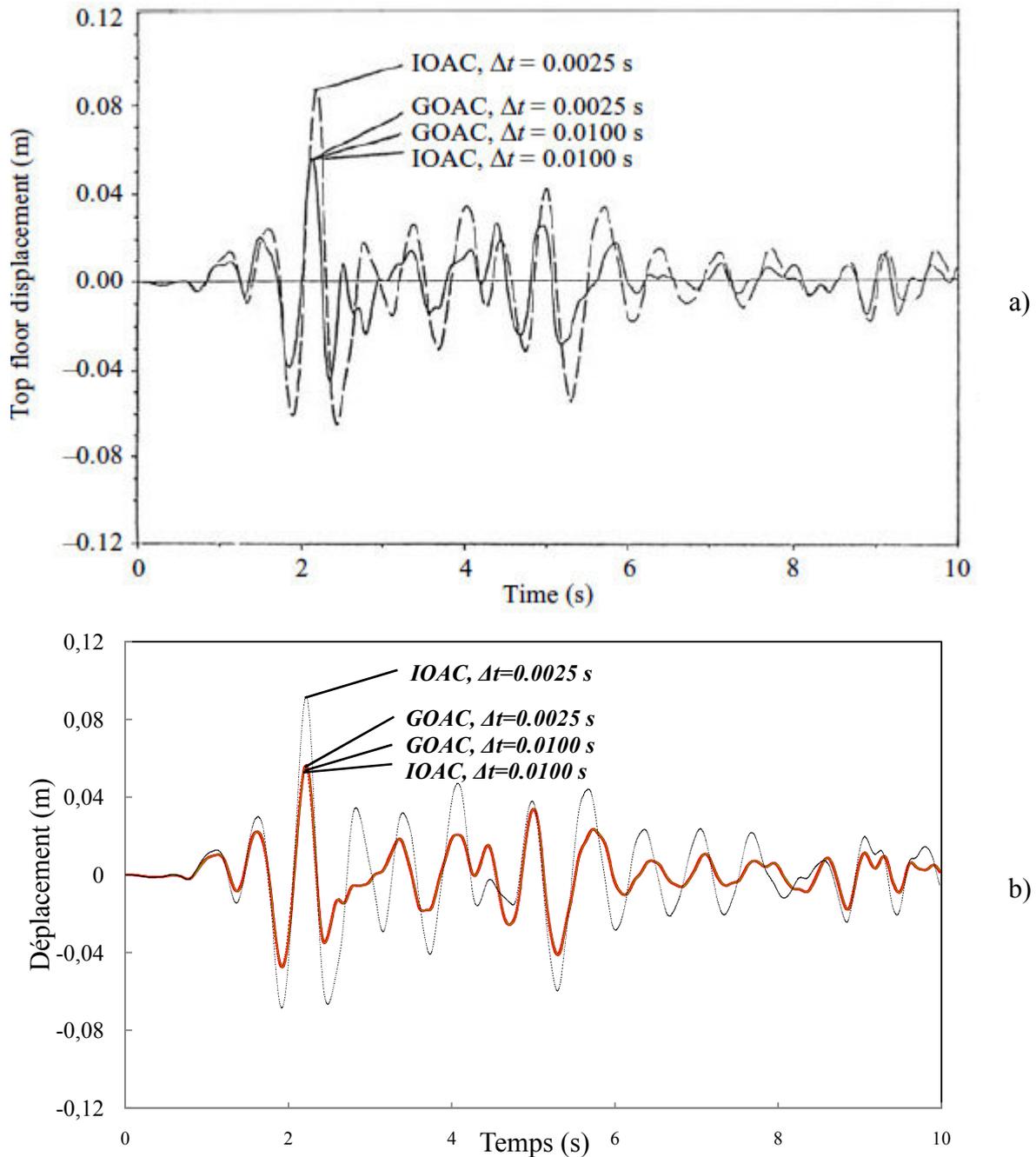


Figure 5.5. Le déplacement du dernier étage du modèle étudié avec contrôle par IOAC et GOAC selon la a) référence [7] et b) notre programme.

De la figure 5.5, on remarque que les résultats obtenus par notre programme correspondent bien aux résultats de la référence [7].

De la même manière, on a représenté dans la figure 5.6.b la variation de la force de contrôle en fonction du temps pour les 02 algorithmes IOAC et GOAC et ceci à partir des résultats

obtenus par notre programme qui sont en suite comparés à ceux de la référence [7] (figure 5.6.a).

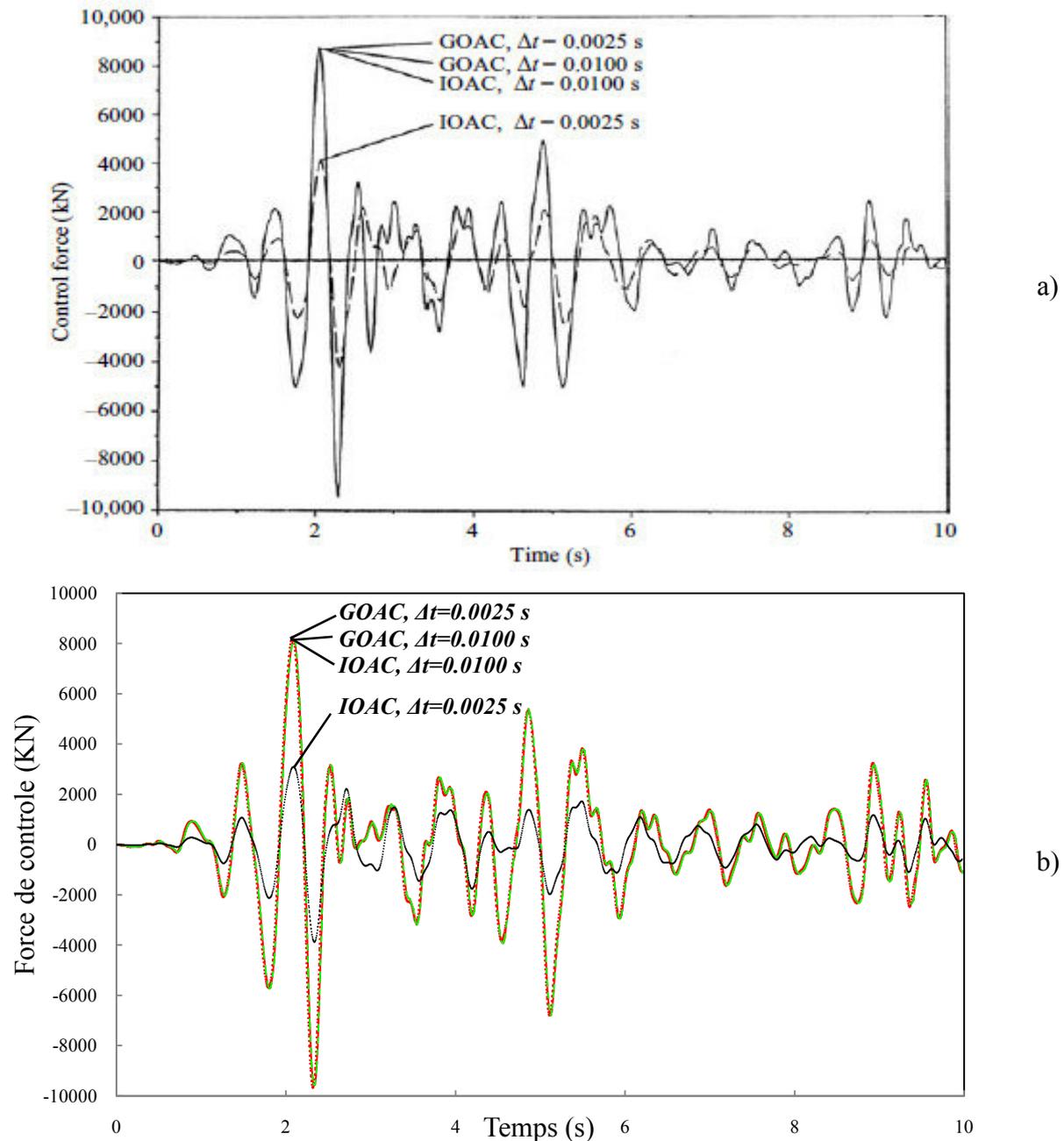


Figure 5.6. La force du contrôle trouvé par a) la référence [7] et b) notre programme.

Une très bonne concordance des résultats est constatée sur la figure 5.6.

b) Cas avec ISS avec contrôle

Le modèle étudié par Cheng est un bâtiment de dix étages, chaque étage à une masse $m=100$ ton et une rigidité $k=1244$ MN/m et la hauteur de chaque étage est $h=3$ m; les coefficients d'amortissement sont respectivement 0.02 et 0.10, le moment d'inerties de masse des étages $I_i-m_i h_{ai}^2=20.83$ ton- m^2 , la fondation est carrée rigide de dimension (6×6) m intégrée de 3 m,

d'une masse $m_f=28.75 \text{ ton}$, le moment d'inertie de fondation $I_0=172.5 \text{ ton}\cdot\text{m}^2$. Les caractéristiques du sol (half-space) : le module de cisaillement $G=7.2 \text{ MN/m}^2$, la densité $\rho=2.0 \text{ gram/m}^3$; le coefficient de poisson $\nu=0.33$, et $\zeta=0.04$, la vitesse des ondes $C_s=60 \text{ m/s}$.

La figure suivante donne les résultats de déplacement du dernier étage trouvés par notre programme et par la référence [7].

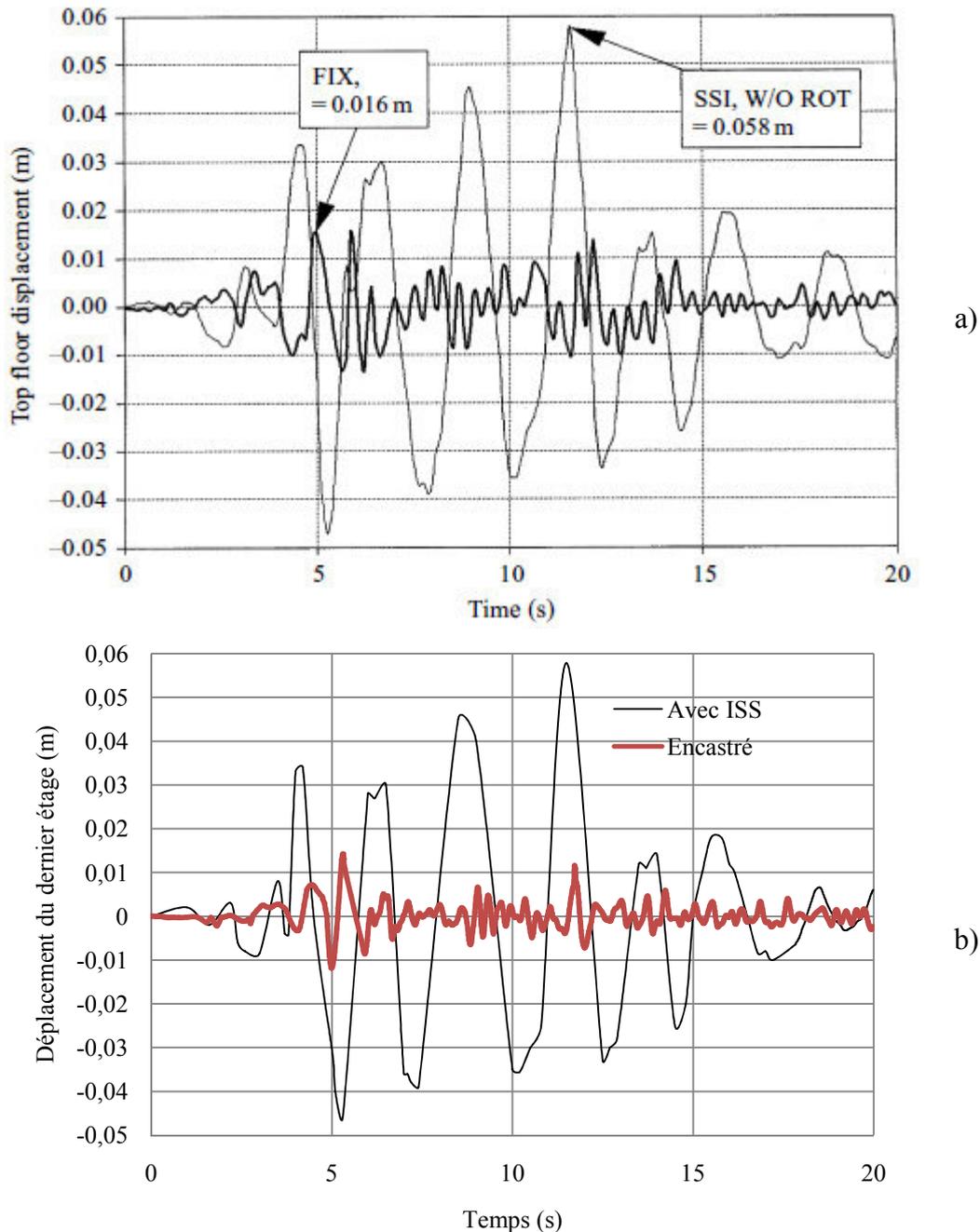


Figure 5.7. Le déplacement du dernier étage du modèle avec contrôle suivant a) la référence [7] et b) notre programme tel que $S/R=0.6$.

Une bonne concordance des résultats est constatée sur la figure 5.7.

5.3 Etude paramétrique

Une étude paramétrique va être menée dans cette section afin de montrer l'influence de certains paramètres tels que : le choix de l'algorithme (ROAC, IOAC ou GOAC), les rapports Q/R et S/R, l'incrément du temps Δt , la position des contrôleurs et le nombre des contrôleurs.

5.3.1 Cas sans ISS

a) Le choix de l'algorithme

Pour le choix de l'algorithme de contrôle, une structure à un seul étage est choisie. Les données sont comme suit (figure 5.8) :

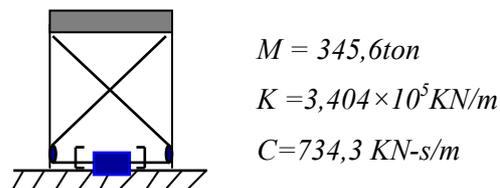
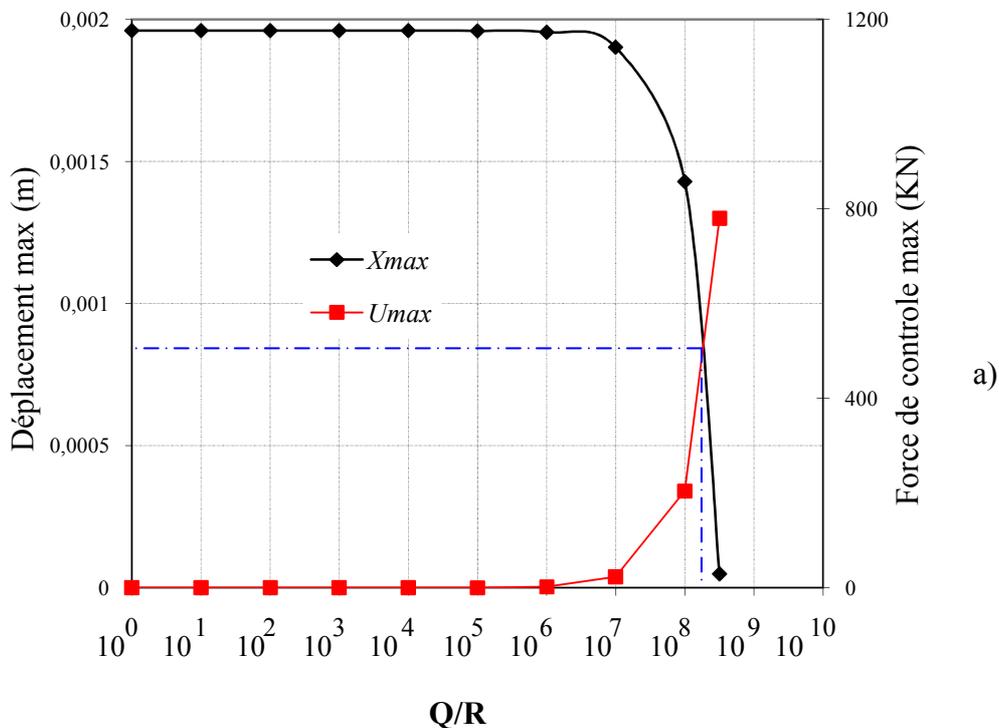


Figure 5.8. Une structure à un seul étage.

Cette structure comportera un tendon actif. On fait varier les rapports de Q/R et S/R dans les deux algorithmes IOAC et GOAC. Les résultats trouvés de déplacement et de force de contrôle de la structure étudié sont représentés dans la figure 5.9.



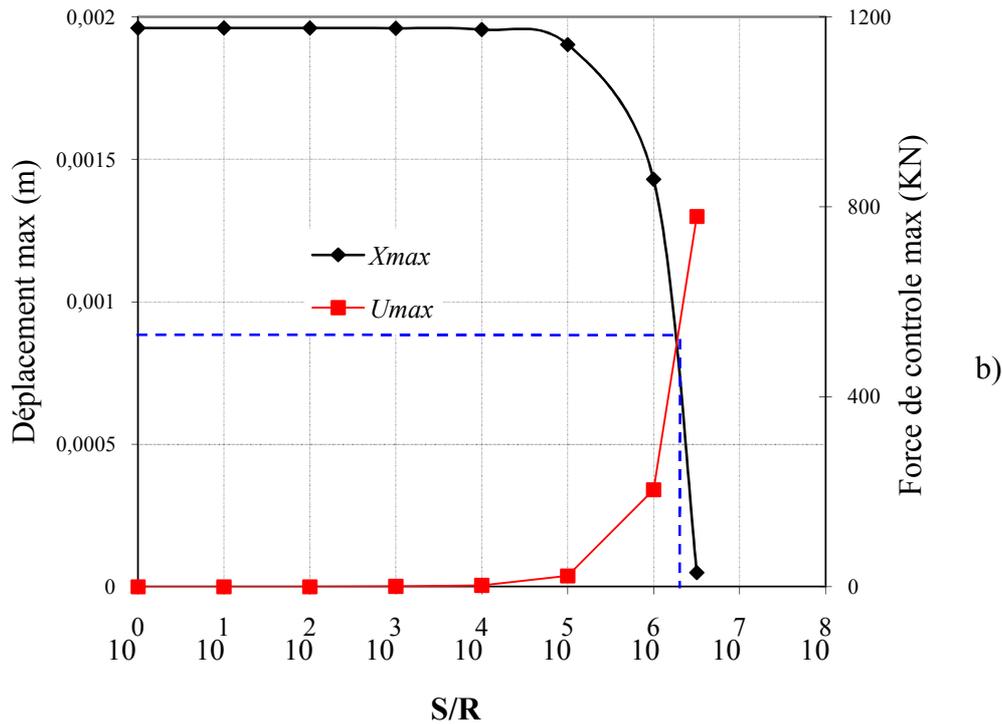


Figure 5.9. Influence du rapport a) Q/R dans l'algorithme IOAC et b) S/R dans l'algorithme GOAC sur le déplacement et la force de contrôle maximum de la structure à un seul étage.

Pour les deux algorithmes IOAC et GOAC, on constate que l'allure de variation de déplacement et de force de contrôle est la même. Le déplacement reste constant fait que la force de contrôle est nulle, puis commence à diminuer lorsque la force de contrôle augmente. L'intersection des deux courbes donne l'optimum entre le déplacement et la force de contrôle. Dans notre cas, on peut lire $S/R=3^E6$ par GOAC et $Q/R=3^E8$ par IOAC (figure 5.9).

Ainsi pour étudier la différence entre les trois algorithmes ROAC, IOAC et GOAC, on va choisir $Q/R=3^E8$ pour les deux algorithmes ROAC et IOAC avec une valeur de $R=0.5$, et $S/R=3^E6$ pour l'algorithme GOAC. Les résultats de déplacement, vitesse et accélération sont représentés dans la figure 5.9.

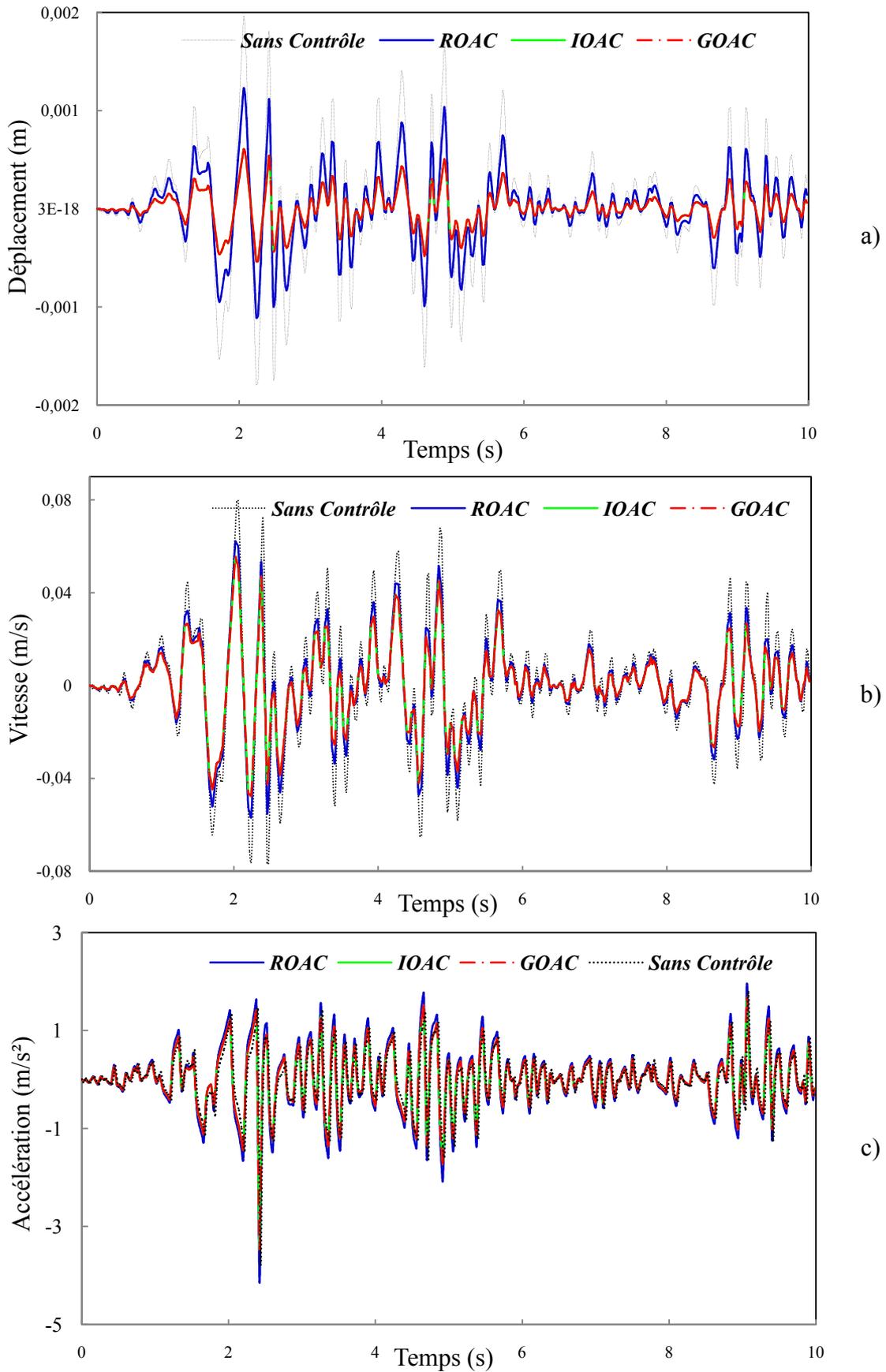


Figure 5.10. a) Le déplacement, b) la vitesse et c) l'accélération de la structure à un seul étage avec contrôle par la trois algorithmes en comparant avec le cas sans contrôle.

Les résultats trouvés de l'histoire de la force de contrôle et la force de contrôle en fonction de déplacement sont représentés sur la figure suivante.

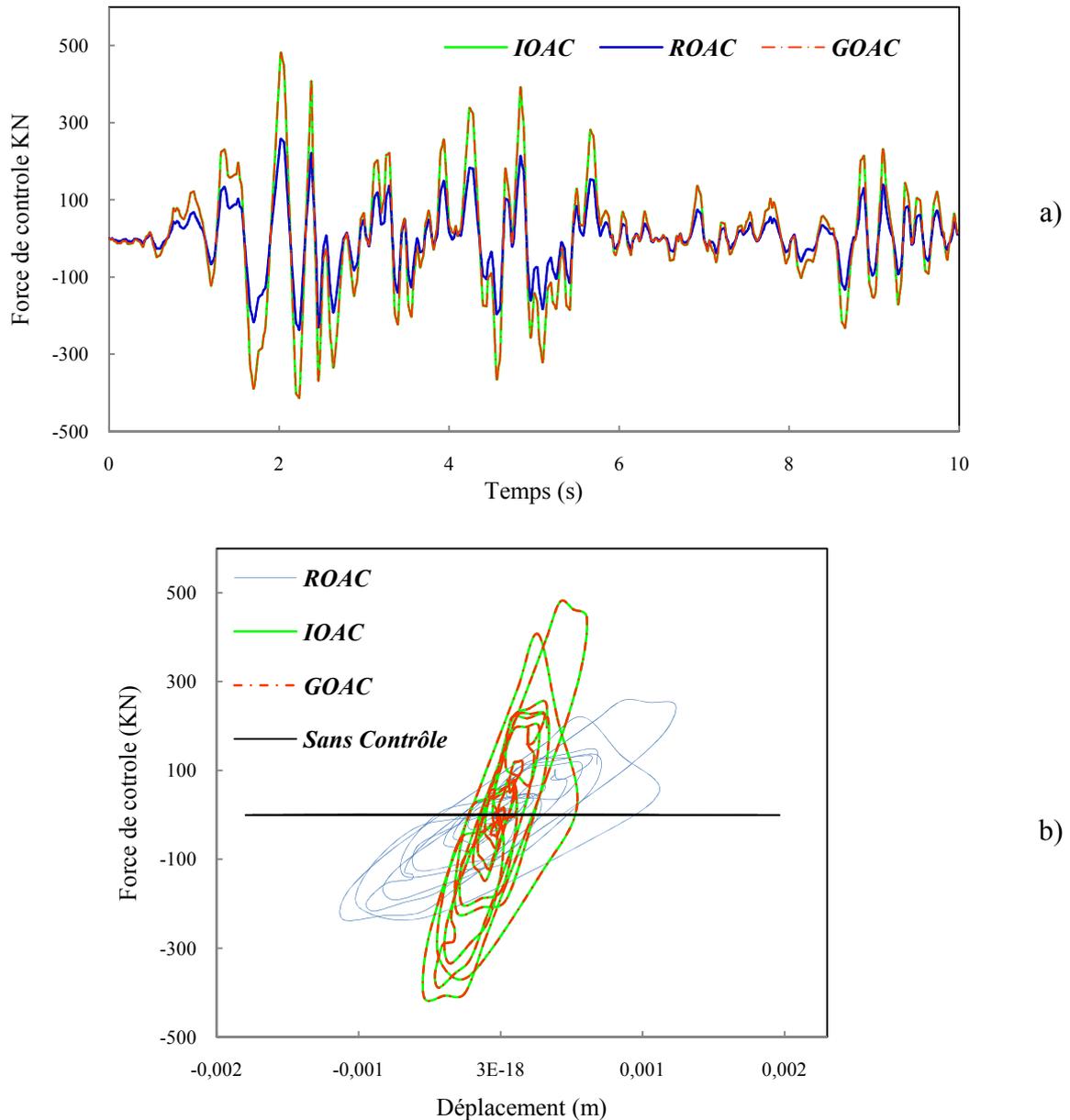


Figure 5.11. a) La force de contrôle de la structure étudiée et b) la force de contrôle en fonction de déplacement de la structure étudiée ($t=4$ s) par les trois algorithmes ROAC, IOAC et GOAC en comparant avec le cas sans contrôle.

D'après la figure 5.10 et 5.11, on constate que les deux algorithmes IOAC et GOAC sont plus efficace que l'algorithme ROAC.

b) Effet du Q/R et S/R

Pour montrer l'importance du choix des rapports Q/R et S/R, une structure à huit étages est choisie, les données sont comme suit (figure 5.12) :

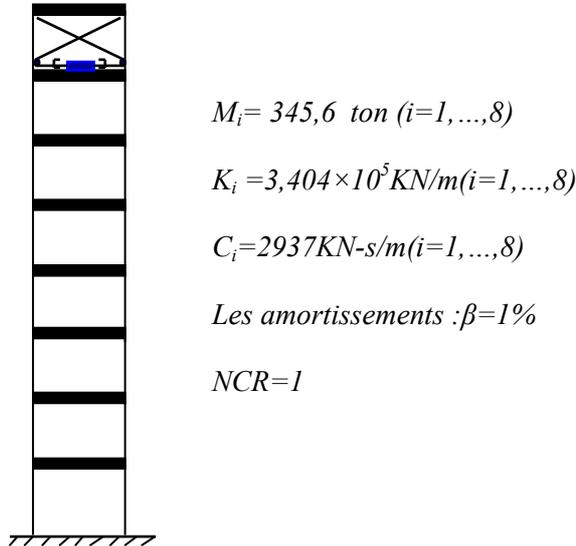
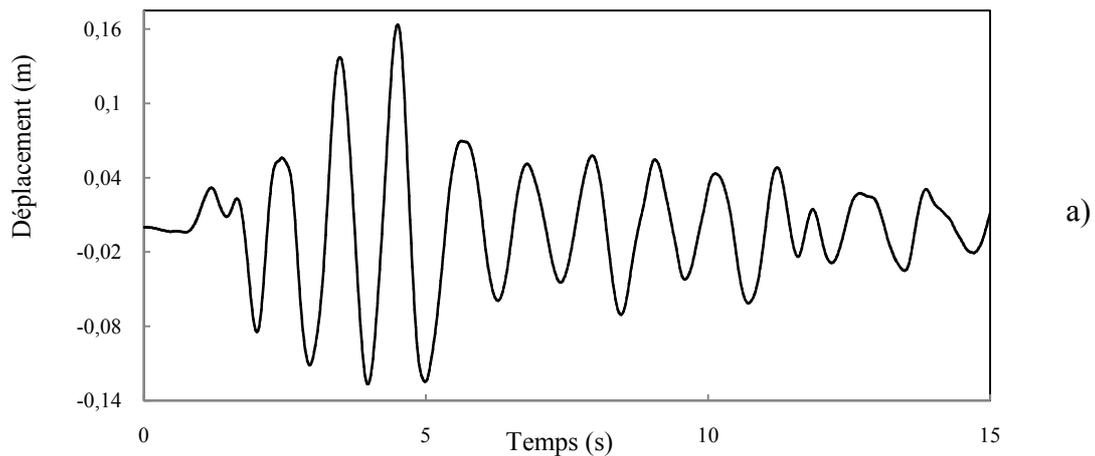


Figure 5.12. Structure à 08 étages [7].

Cette structure comportera un tendon actif placé au dernier étage.

On a d'abord tracé l'histoire de déplacement, vitesse et accélération dans le cas sans contrôle (figure 5.13).



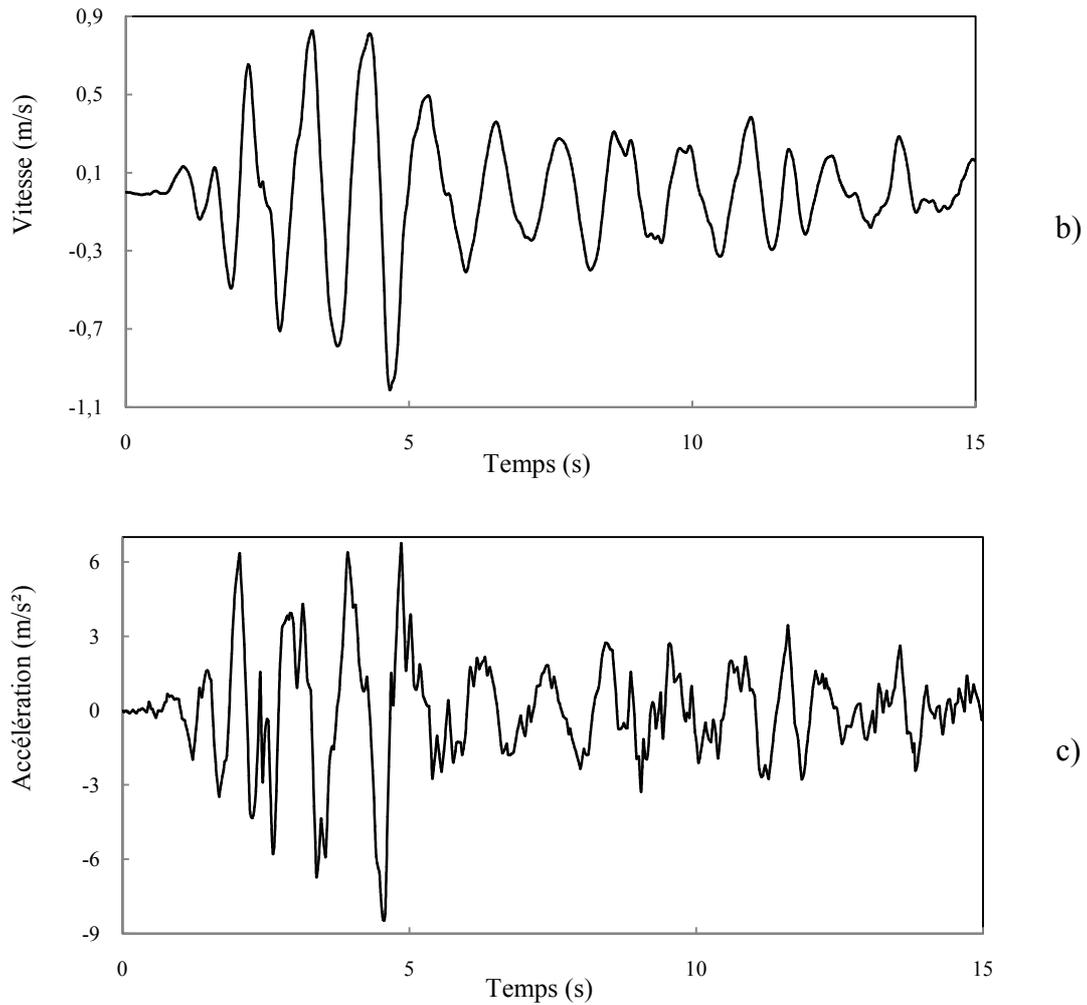


Figure 5.13. a) Le déplacement, b) la vitesse et c) l'accélération du dernier étage de la structure à 8 étage sans contrôle.

Ensuite on a fait varier les rapports Q/R et S/R dans le cas avec contrôle, tout en considérant les trois algorithmes ROAC, IOAC et GOAC.

Les résultats obtenus de déplacement et de la force de contrôle maximums du dernier étage sont représentés dans la figure 5.14.

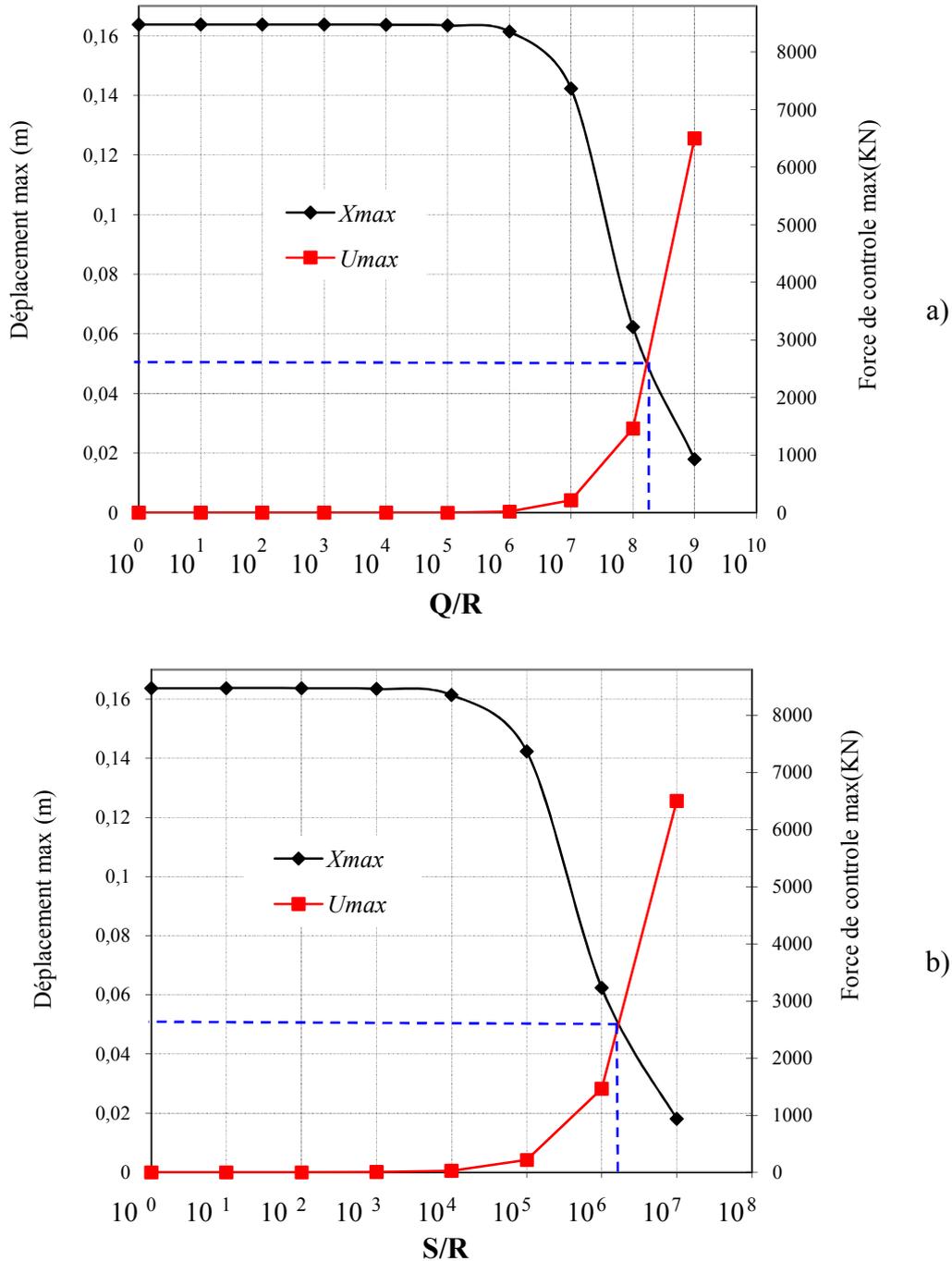


Figure 5.14. Influence du rapport a) Q/R dans l'algorithme IOAC et b) S/R dans l'algorithme GOAC sur le déplacement et la force de contrôle maximum du dernier étage de la structure à 08 étages.

Même remarque de la figure 5.9 concernant l'allure de variation de déplacement et de force de contrôle trouvés dans la figure 5.14. Dans ce cas, on peut lire $S/R=2^E6$ pour GOAC et $Q/R=2^E8$ pour IOAC.

Ainsi pour la suite de cette exemple, on va choisir $Q/R=2^E8$ pour les deux algorithmes ROAC et IOAC et $S/R=2^E6$ pour l'algorithme GOAC avec une valeur de $R=0.001$ en essayant de

montrer la différence entre les trois algorithmes en comparant avec le cas sans contrôle. Les résultats trouvés sont représentés sur la figure 5.15 pour tous les étages alors que la figure 5.16 représente le déplacement et la force de contrôle de dernier étage.

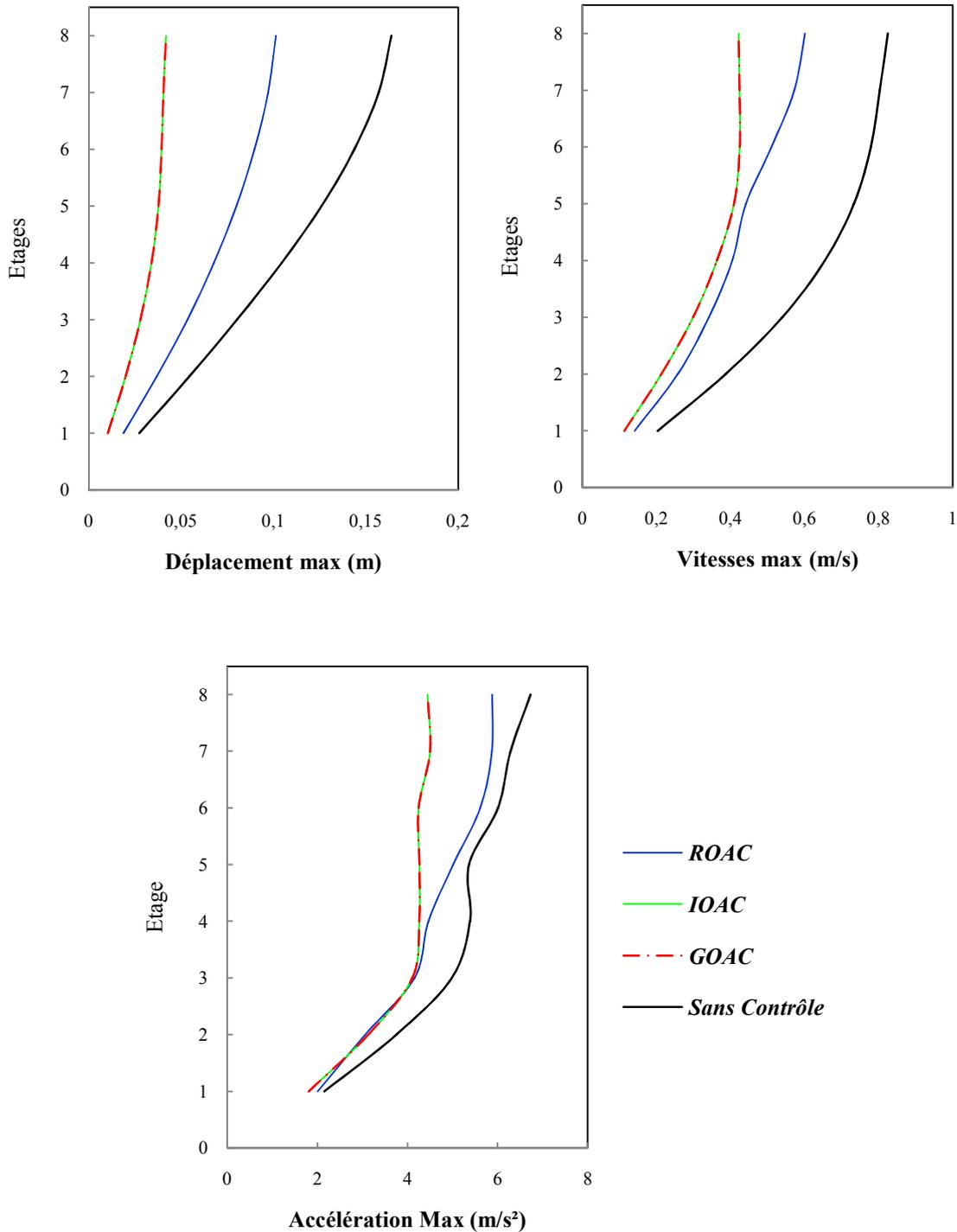


Figure 5.15. Déplacement, Vitesse et Accélération maximums de la structure à 08 étage par les trois algorithmes ROAC, IOAC et GOAC et le cas sans contrôle.

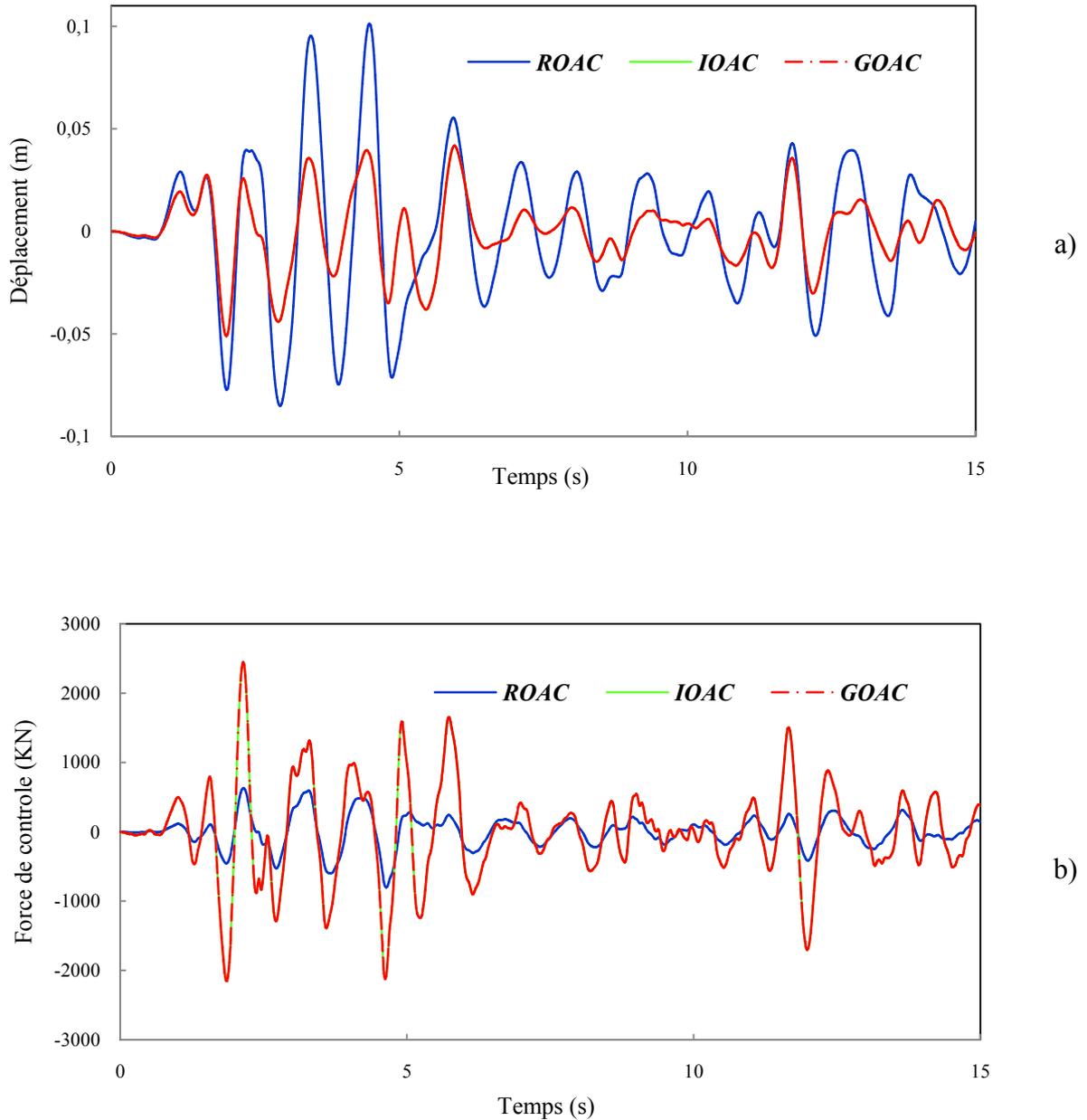


Figure 5.16. a) Le déplacement du dernier étage et b) la force de contrôle de la structure à 08 étages par les trois algorithmes ROAC, IOAC et GOAC.

On comparant les résultats de la structure étudié, on remarque que le déplacement est plus important dans le cas de l’algorithme ROAC que celui des deux algorithmes IOAC et GOAC, et la force de contrôle est moins importante dans le cas de l’algorithme ROAC que celui des deux algorithmes IOAC et GOAC.

c) Effet de l'incrément du temps Δt

L'objectif de cette analyse est de voir l'influence de l'incrément du temps sur la réponse structurelle en faisant varier le type d'algorithme GOAC et IOAC. L'exemple traité est une structure à 15 étages dont les caractéristiques sont données dans la figure suivante (Figure 5.17). Le tendon actif placé au dernier étage.

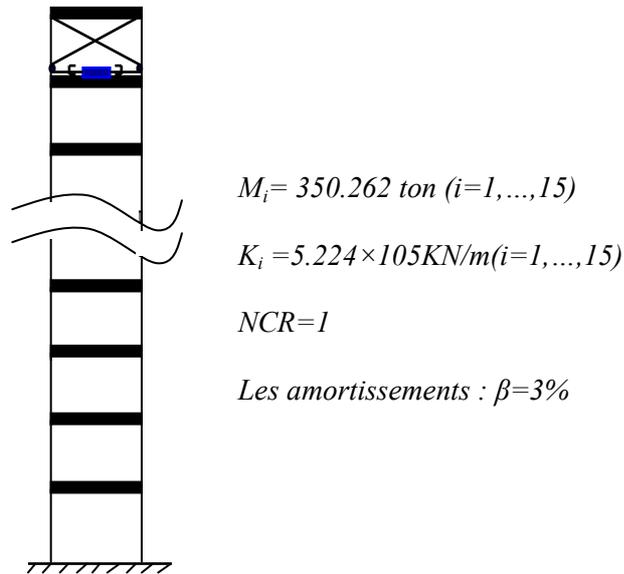


Figure 5.17. Structure à 15 étages [59].

Dans la figure 5.18, on a représenté la variation du déplacement et de la force de contrôle maximum du dernier étage en fonction des rapports Q/R et S/R afin de définir les valeurs optimales par la suite de l'étude. Le pas du temps dans ce cas est fixé à $\Delta t=0.02 \text{ s}$.

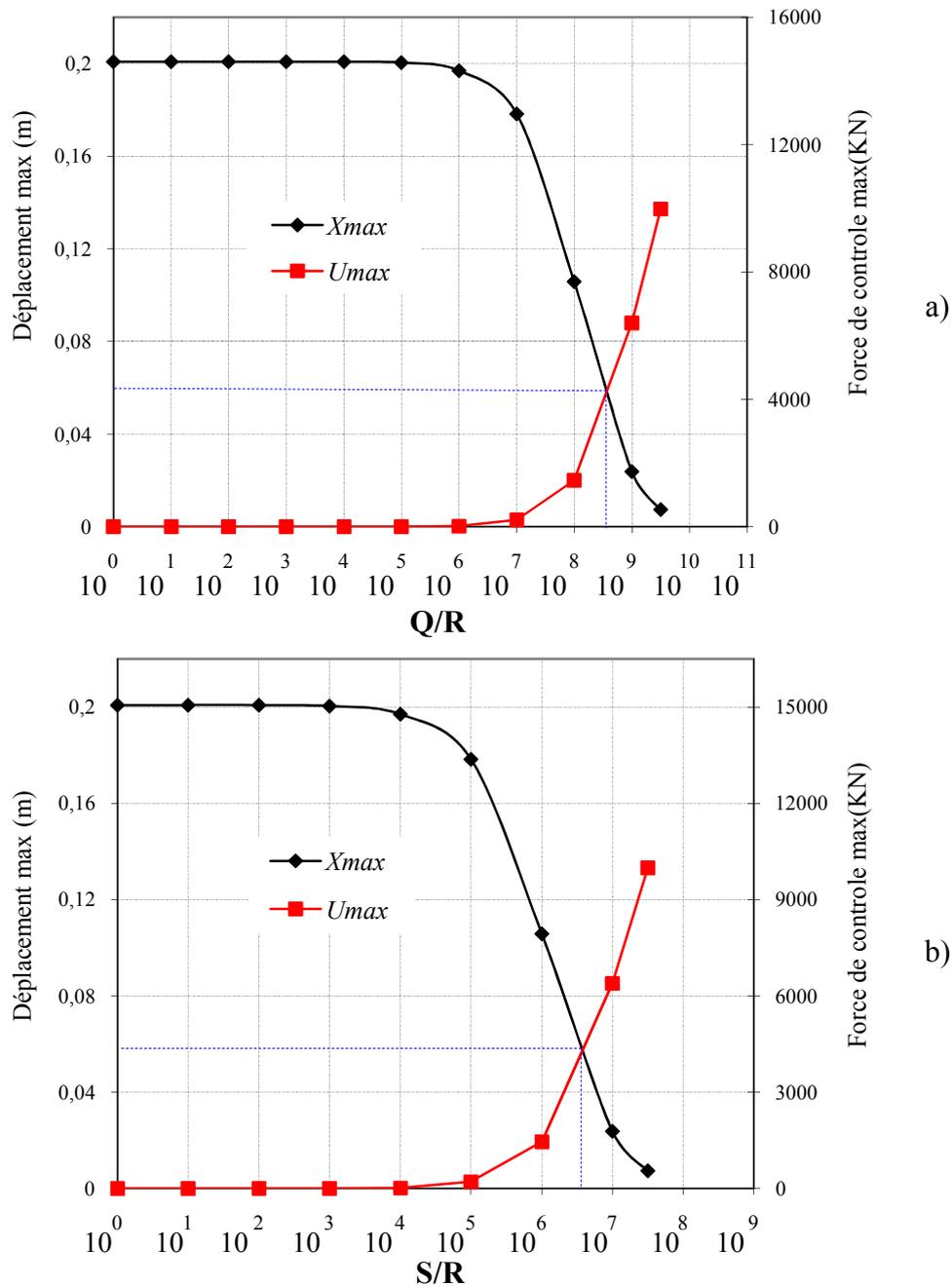


Figure 5.18. Influence du rapport a) Q/R dans l'algorithme IOAC et b) S/R dans l'algorithme GOAC sur le déplacement et la force de contrôle maximum du dernier étage (structure à 15 étages).

D'après la figure 5.18, on prendra $Q/R=6^E8$ pour l'algorithme IOAC et $S/R=6^E6$ pour l'algorithme GOAC.

On va étudier l'influence de l'incrément de temps sur les deux algorithmes IOAC et GOAC. La figure 5.19 suivante donne les résultats trouvés de déplacement, de vitesse et d'accélération maximum de tous les étages de la structure à 15 étages pour différentes valeurs de l'incrément de temps Δt .

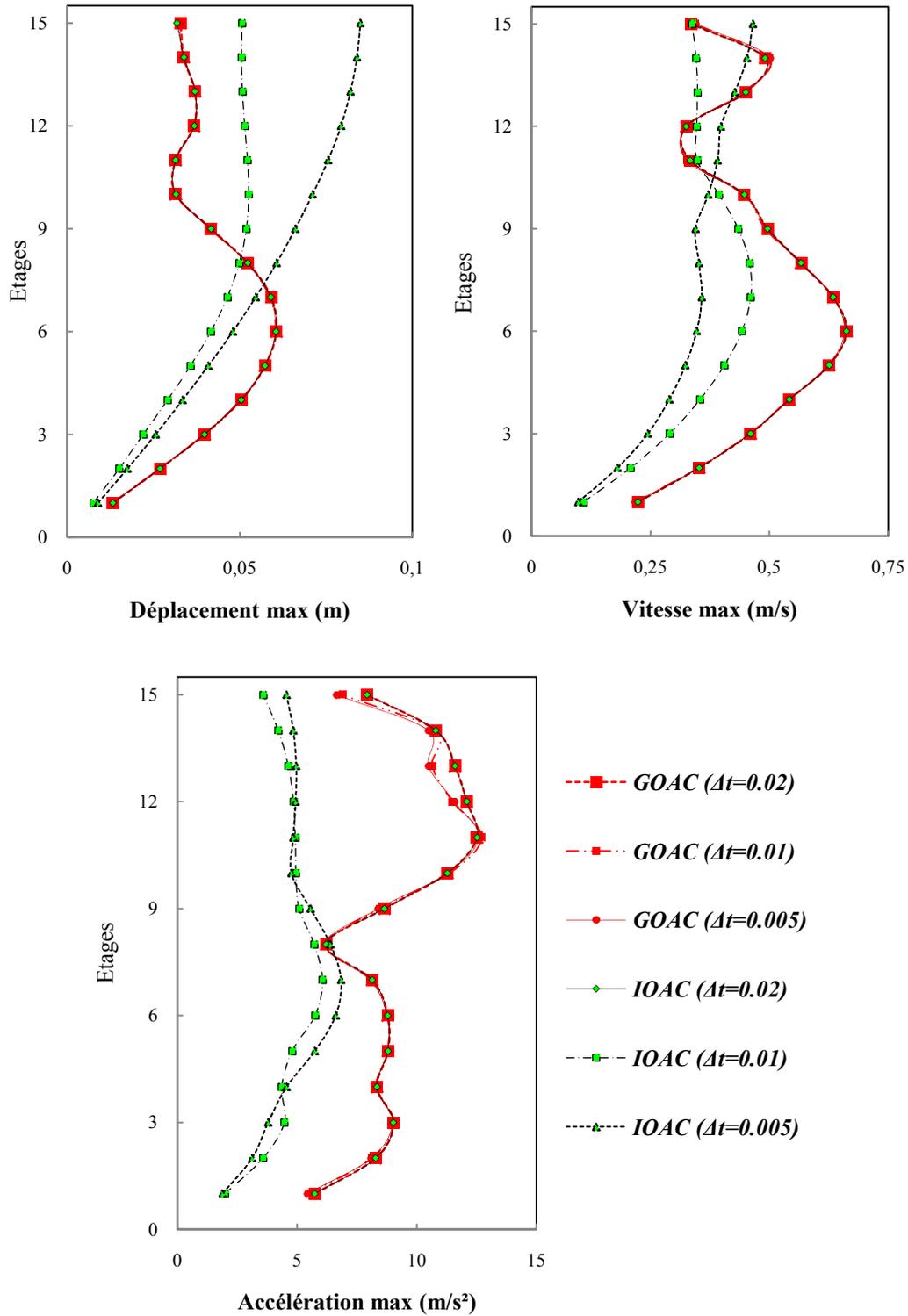


Figure 5.19. L'influence de l'incrément du temps sur le déplacement, la vitesse et l'accélération maximums (structure à 15 étages).

On remarque que les déplacements, vitesses et accélérations sont sensibles à l'incrément du temps Δt pour l'algorithme IOAC alors qu'ils sont indépendants de Δt pour l'algorithme GOAC. Ceci montre l'importance de l'algorithme GOAC.

C'est cet algorithme qui va être utilisé dans la suite des exemples traités.

d) Effet de la position des contrôleurs

Dans cette partie, on va essayer de changer la position du tendon actif afin de montrer l'importance du positionnement du contrôle sur la réponse structurale. La structure utilisée est la structure de 15 étages (figure 5.17).

Pour cela, trois positions sont proposées sur la figure 5.20.

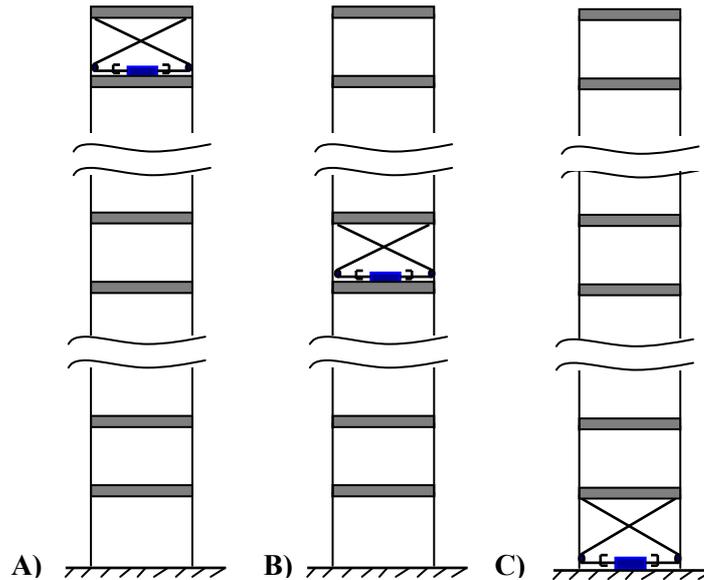


Figure 5.20. Changement de la position du tendon actif a) Position A : Tendon actif dans le dernier étage, b) Position B : dans le 8ème étage, et c) Position C : dans le premier étage.

La figure 5.21 suivante représente les résultats trouvés de déplacement, de vitesse et d'accélération maximums pour les trois positions du tendon actif, avec $\Delta t=0.02$ s. le cas sans contrôle est ajouté pour le besoin de comparaison.

La figure 5.22 donne les résultats trouvés de la force du contrôle pour les trois positions du tendon actif.

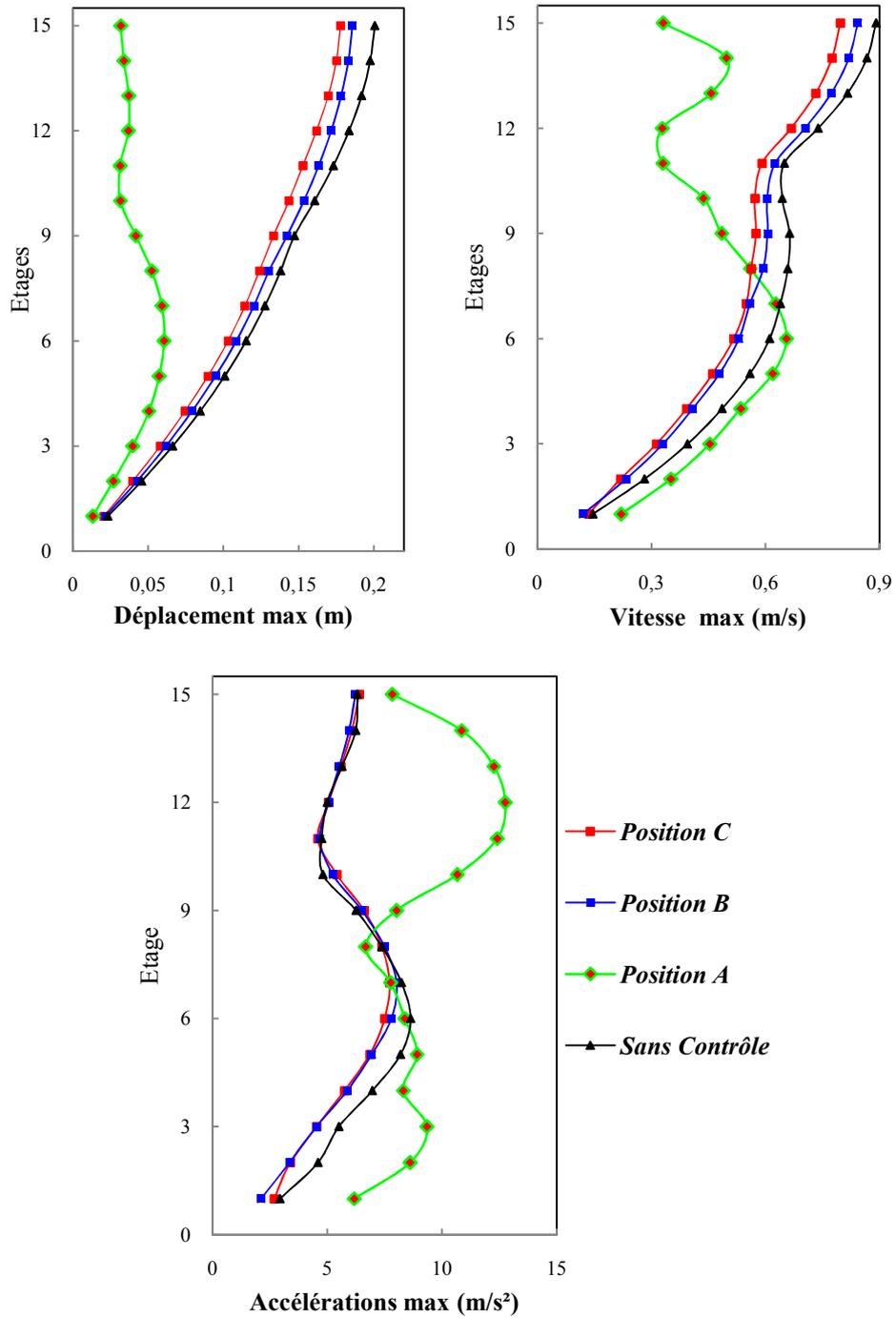


Figure 5.21. Effet de la position du tendon actif sur la réponse structurelle (structure à 15 étages).

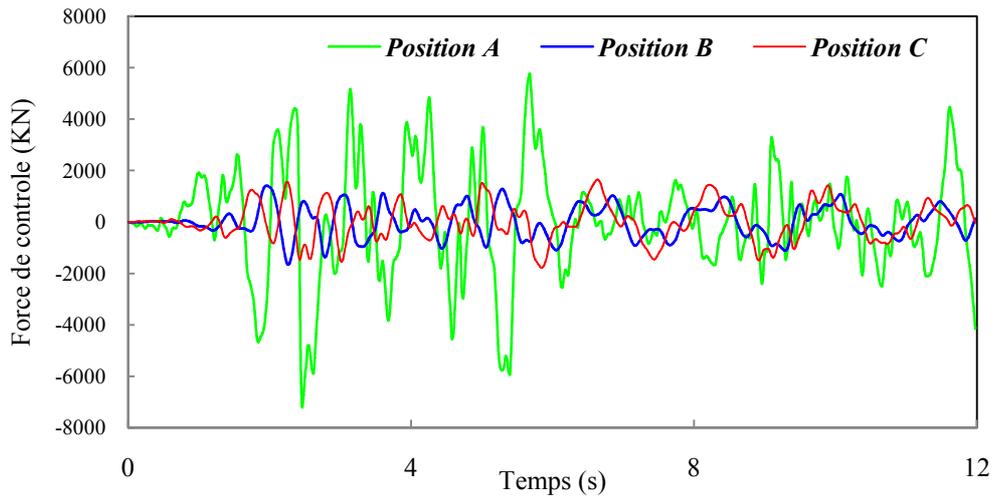


Figure 5.22. L'effet de la position des tendons actifs sur la force de contrôle (structure à 15 étages).

Dans le cas de la position A, on remarque qu'il y a une grande diminution de déplacement par rapport aux 02 autres positions. Evidemment, un tendon actif placé au 1^{ère} étage (cas C) influe très peu sur les déplacements maximums et la force de contrôle.

Concernant la force de contrôle, on remarque que la force de contrôle trouvée dans la position A est la plus grande en comparant par les résultats trouvée par les deux autres positions.

5.3.2 Cas avec ISS

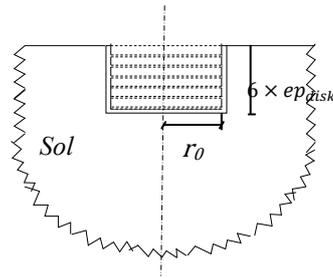
Pour étudier l'effet du contrôle sur la structure en tenant compte l'effet de l'ISS, deux structures sont choisies : une structure à 03 étages et une structure à 06 étages. Les caractéristiques sont données dans la section suivante

a) Importance du contrôle

Cette partie a pour but de montrer l'influence et l'importance du contrôle sur la structure en tenant compte l'effet d'ISS en comparant avec le cas d'encastrement.

a).1. Structure à 03 étages

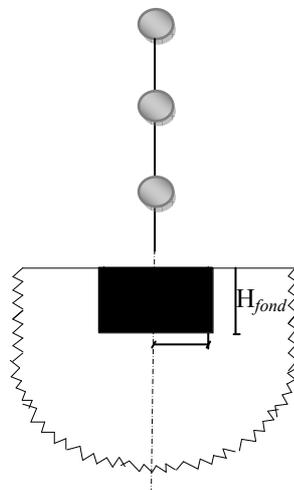
Le modèle étudié de la structure et du sol dans cette application pour la prise en compte de l'effet d'ISS est illustré dans la figure suivante :



Les caractéristiques du sol :

- $ep_{disk}=0.5 \text{ m}$,
- $r_0=2\text{m}$,
- $\nu=0.3$,
- $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$,
- $\zeta= 5\%$ et $G=27 \text{ MPa}$

a) les caractéristiques du sol.



Les données de la structure :

- $M_i=350,262 \text{ ton}(i=1, \dots, 3)$
- $K_i=5,254^E5 \text{ KN/m} \quad (i=1, \dots, 3)$

Les données de fondation :

- $H=3 \text{ m}$, $D_{fon}=2 r_0$,
- $m_f=28.75 \text{ ton}$
- $I_0=172.5 \text{ ton.m}^2$

b) les données de la structure à 03 étages.

Figure 5.23. Le modèle étudié.

Le tableau 5.3 suivant donne les résultats trouvés de la matrice de la rigidité du sol $[\tilde{K}_{00}]$ étudié.

Tableau 5.3. La matrice de la rigidité du sol $[\tilde{K}_{00}]$.

$[\tilde{K}_{00}] = \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix}$		
<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
827261,766	-7243805,42	144541041

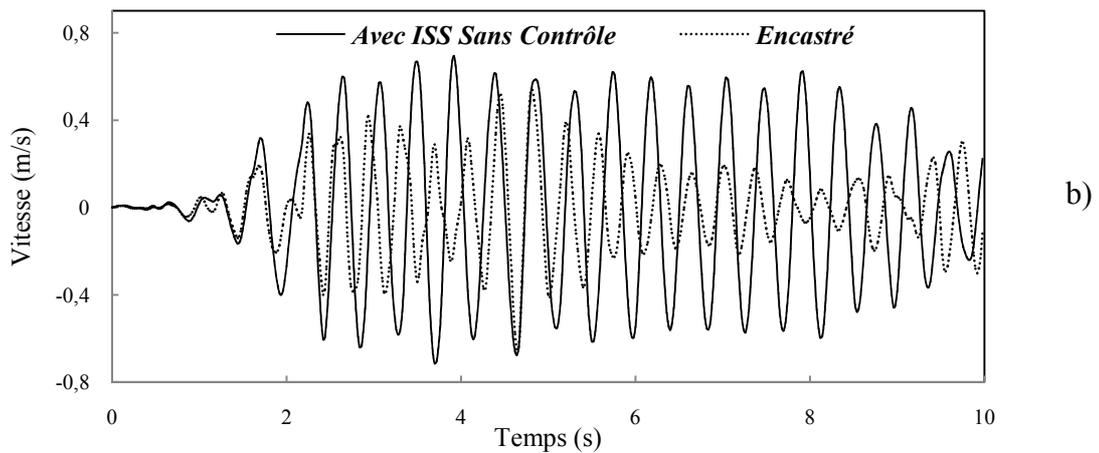
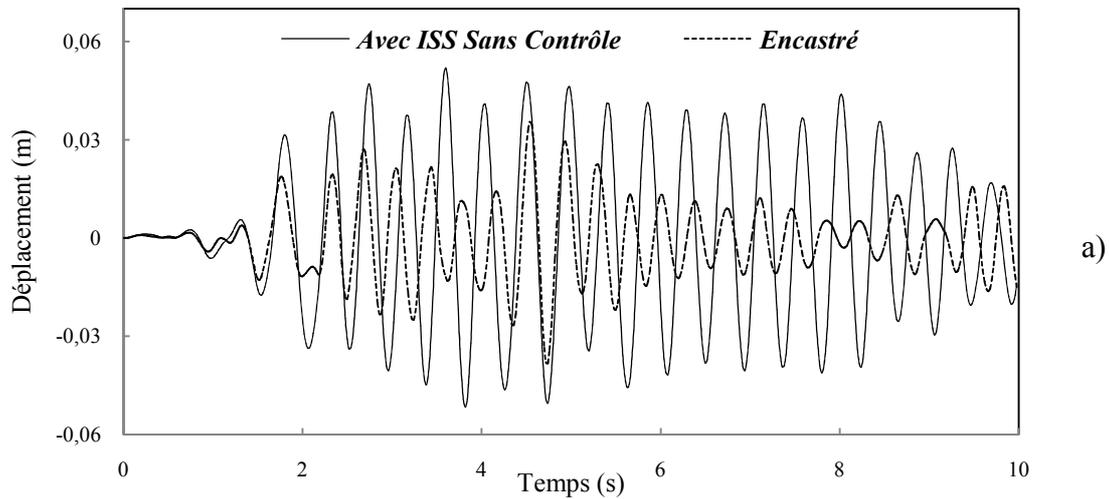
Dans le tableau 5.3, on a donné les pulsations propres des 03 premiers modes par les deux cas avec ISS et sans ISS (cas d'encastrement).

On remarque bien que les pulsations propres du cas d'encastrement sont supérieures que celles du cas de l'ISS.

Tableau 5.4. Les pulsations propres du modèle étudié avec et sans ISS.

<i>ETAGE</i>	<i>ISS</i>	<i>Encastré</i>
<i>1</i>	14,5146205	17,2365123
<i>2</i>	43,1624902	48,2956341
<i>3</i>	68,0913484	69,7892133

La figure suivante donne l'histoire du déplacement, vitesse et accélération du dernier étage du modèle avec ISS et qui sont comparés à ceux de cas d'encastrement.



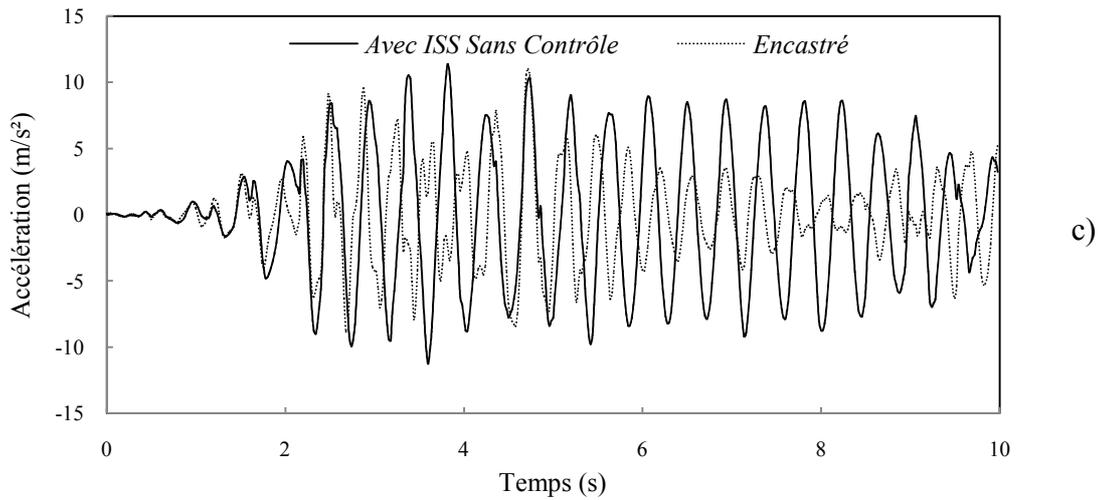


Figure 5.24. a) Le déplacement, b) la vitesse et c) l'accélération du dernier étage du modèle étudié en tenant compte de l'effet d'ISS en comparant avec le cas encastré sans contrôle.

On suppose maintenant que le modèle est contrôlé par un système de type tendon actif placé au premier étage. L'algorithme utilisé est l'algorithme GOAC. On va utiliser différentes valeurs des rapports S/R, pour trouver la valeur optimum du rapport S/R. les résultats sont tracés dans la figure suivante.

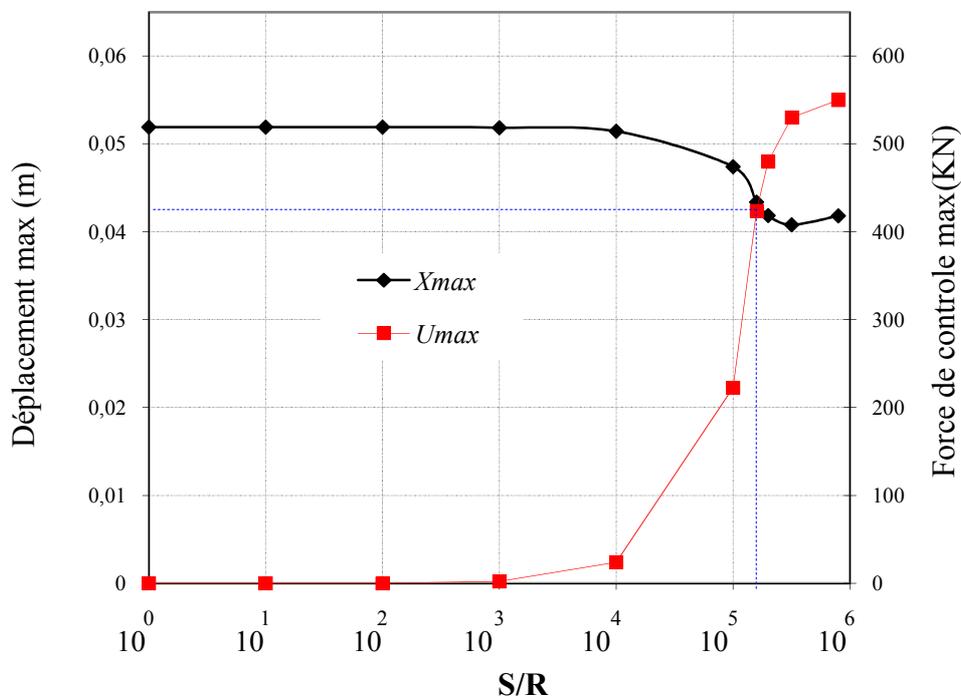


Figure 5.25. Le déplacement du dernier étage et la force de contrôle maximum pour différents valeurs de S/R du modèle étudié.

D'après la figure 5.25, la valeur choisit est $S/R=2^E5$.

La figure 5.26 suivante donne les résultats trouvés des déplacements, de vitesse et d'accélération maximum de tous les étages avec et sans contrôle en tenant compte de l'effet de l'ISS. On a ajouté sur la figure le cas de l'encastrement (sans ISS) pour la comparaison.

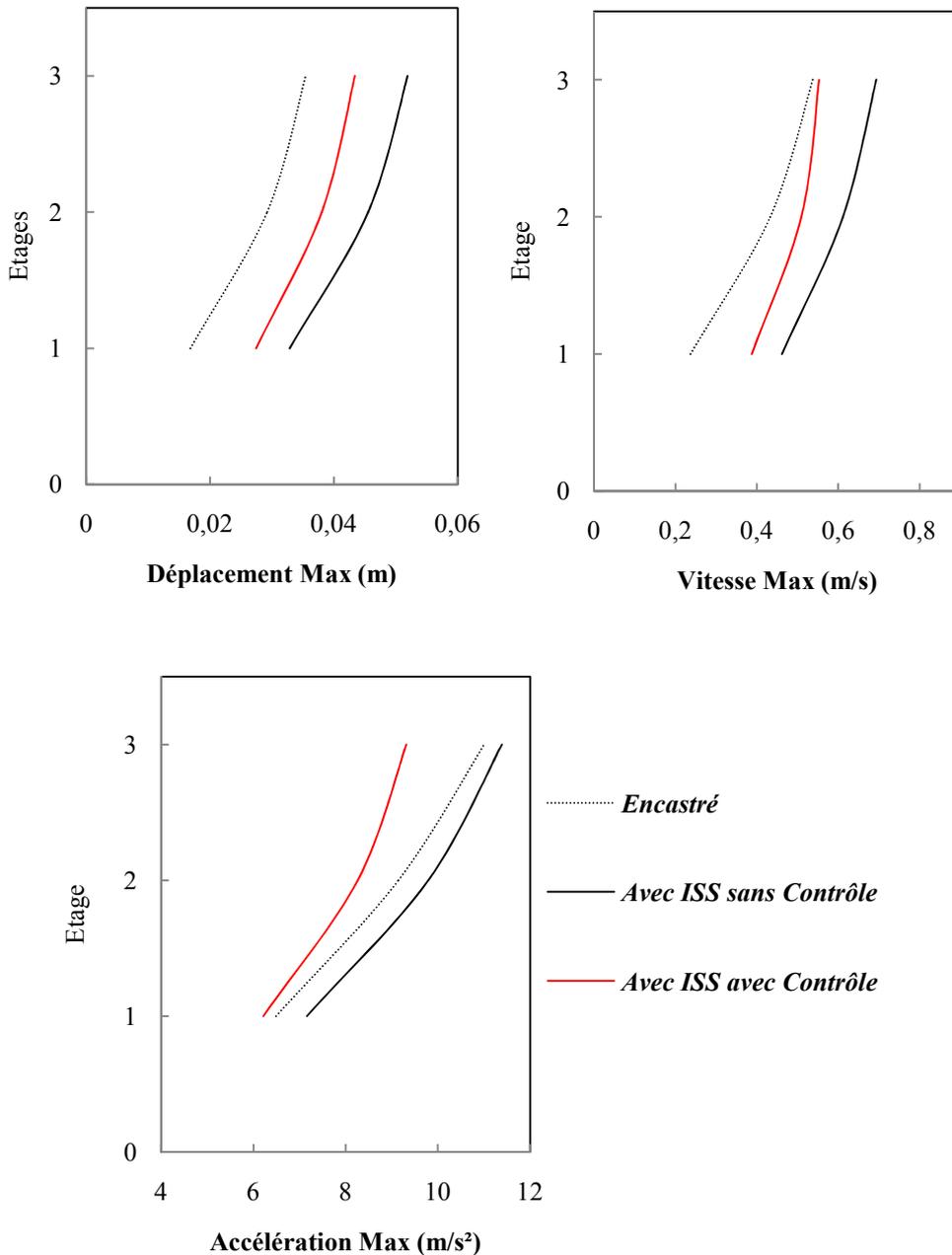
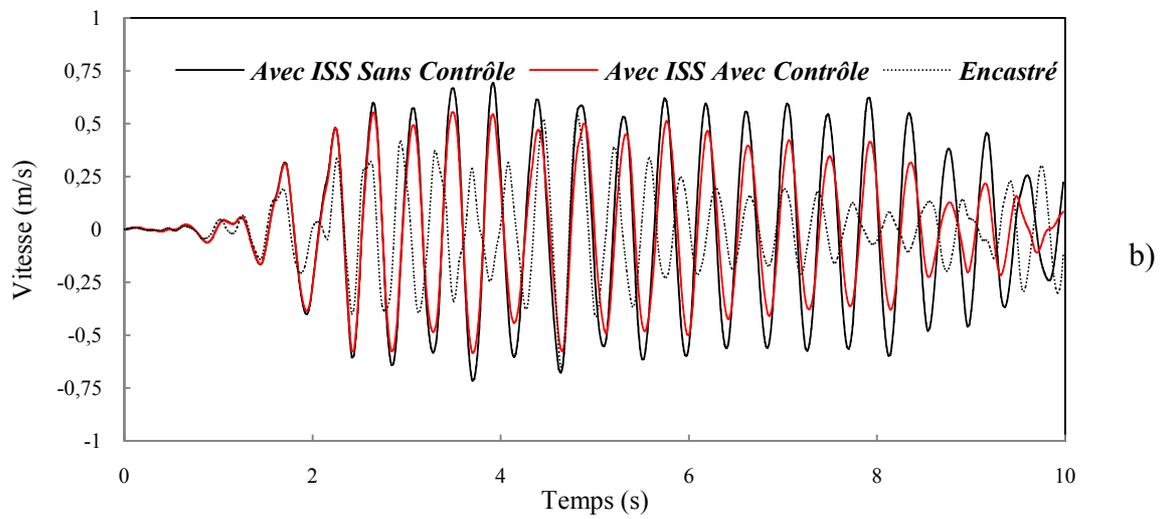
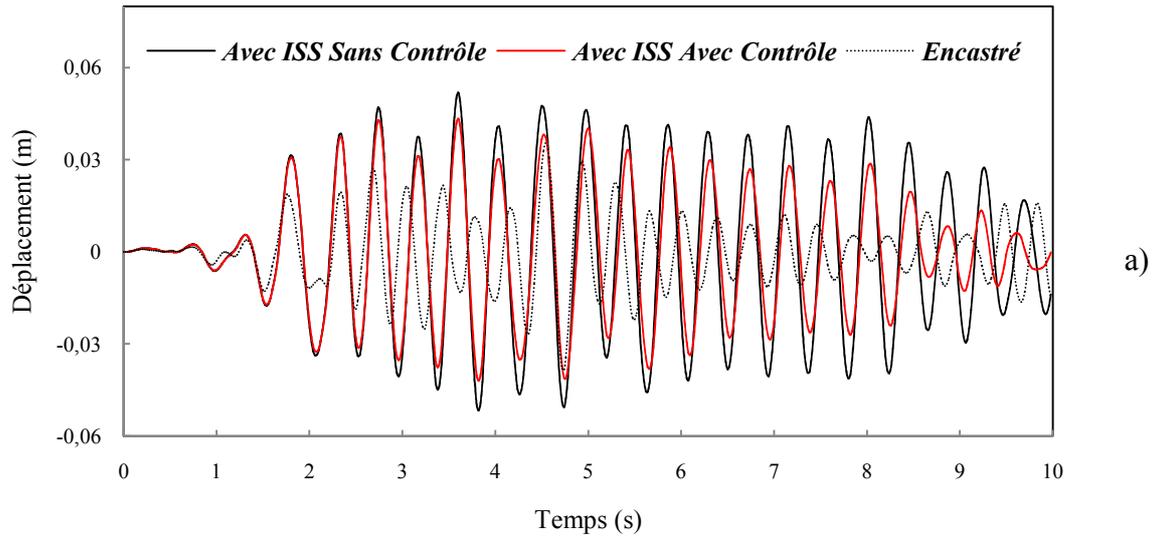


Figure 5.26. Le déplacement, vitesse et accélération maximum des sommets du modèle étudié avec ISS avec et sans contrôle en comparant avec le cas d'encastrement.

De la figure 5.26, on peut voir que le déplacement d'une structure en tenant compte de l'ISS, diminue en présence d'un système de contrôle et converge vers le déplacement d'une structure encastree (sans ISS).

On a ensuite représenté la variation du déplacement, vitesse et accélération du dernier étage en fonctions du temps dans la figure 5.27.



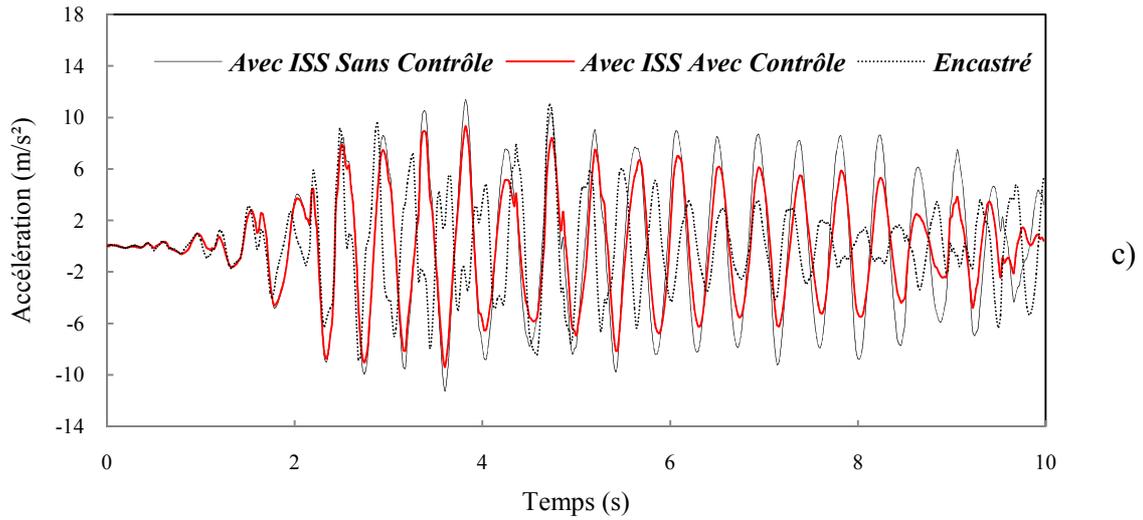
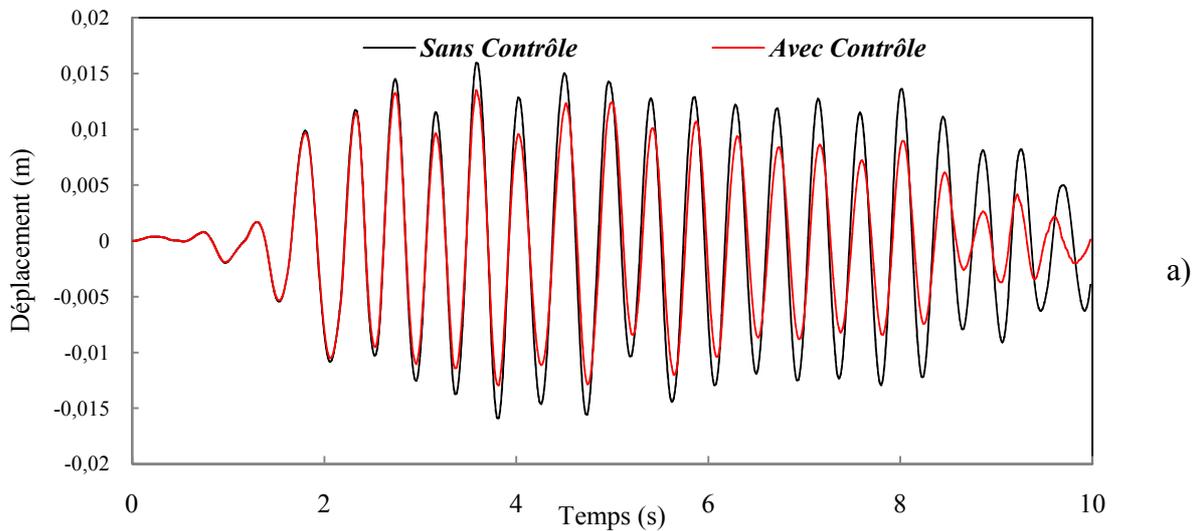


Figure 5.27. a) Le déplacement, b) la vitesse et c) L'accélération du dernier étage du modèle étudié avec ISS avec et sans contrôle en comparant avec le cas d'encastrement.

De la figure 5.27, on retrouve l'effet du contrôle sur le déplacement, la vitesse et l'accélération au niveau du dernier étage.

De même, sur la figure 5.28, on a représenté maintenant la variation de déplacement, vitesse et accélération au niveau de la fondation en fonction du temps.



a)

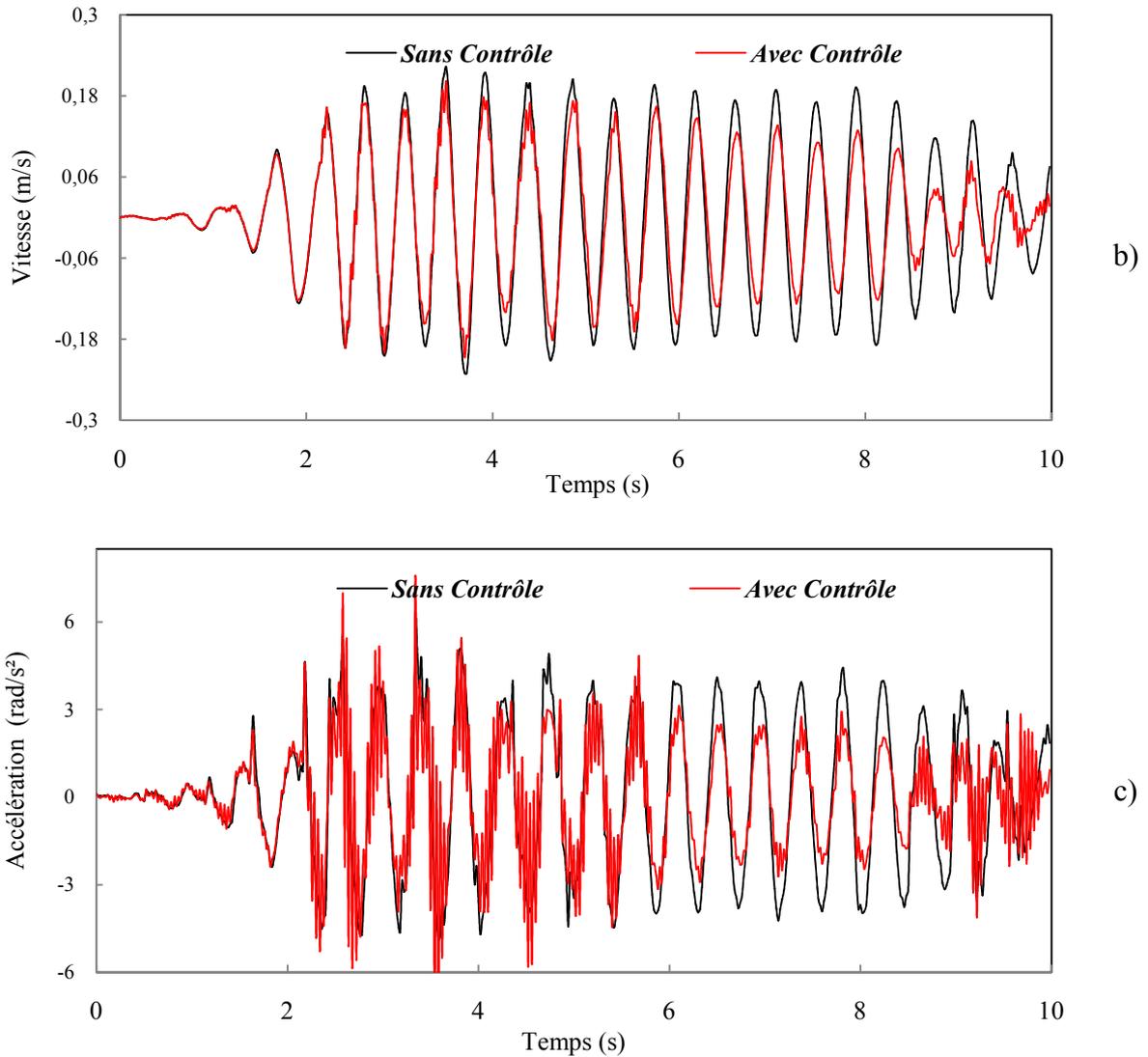


Figure 5.28. a) Le déplacement, b) la vitesse et c) L'accélération du fondation avec et sans contrôle.

On observe dans la figure 5.28 une petite diminution de déplacement entre le cas sans contrôle et avec contrôle, et une petite variation de vitesse et d'accélération.

La figure suivante donne la rotation, vitesse de rotation et accélération de rotation de la fondation avec et sans contrôle.

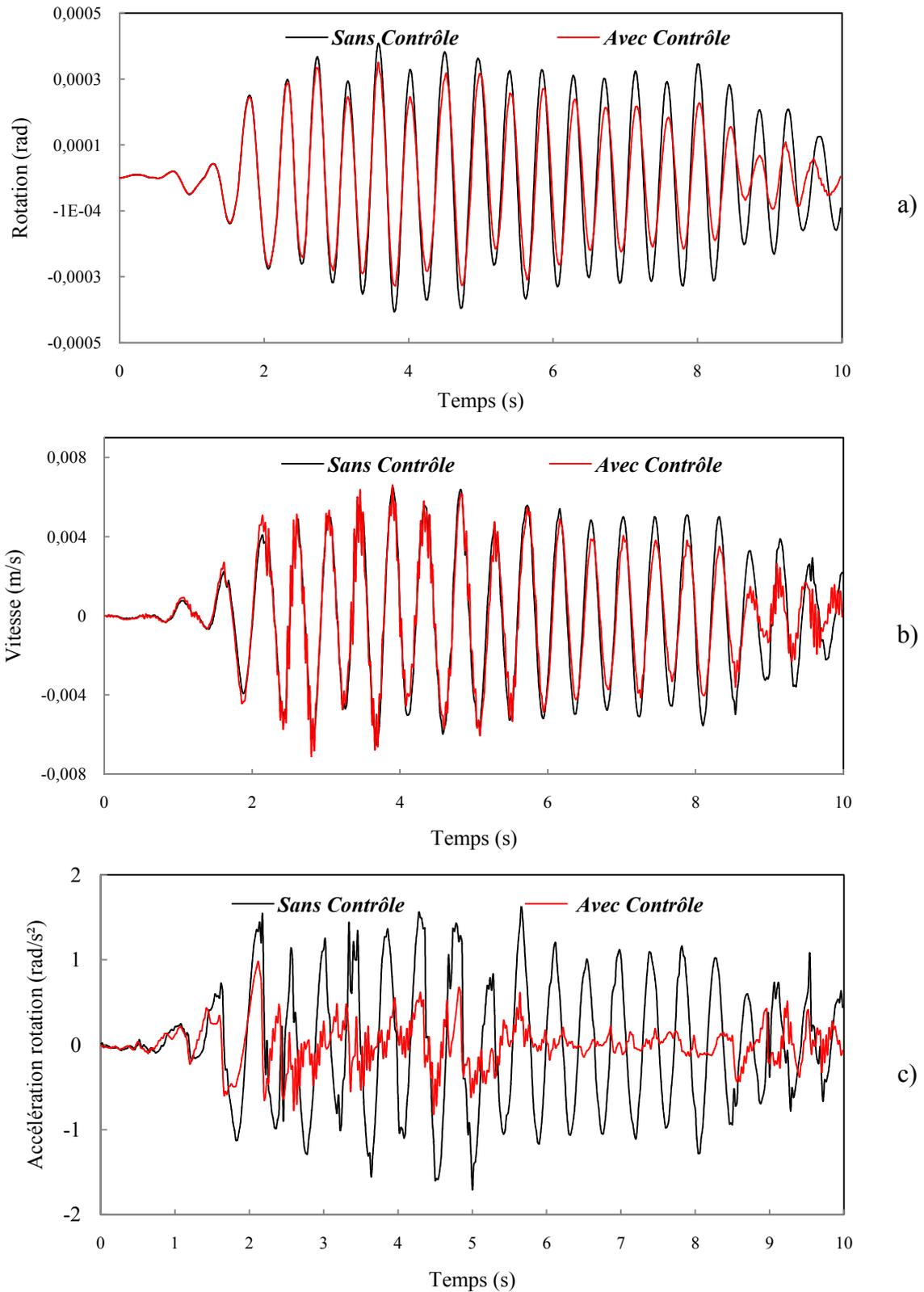


Figure 5.29. a) La rotation, b) la vitesse de rotation et c) L'accélération de rotation du fondation avec et sans contrôle.

En fin dans la figure 5.30, on a représenté la variation de la force de contrôle en fonction du temps ainsi que la relation force déplacement du dernier étage.

De cette figure on peut tirer que la force de contrôle maximal est de 424,081 KN.

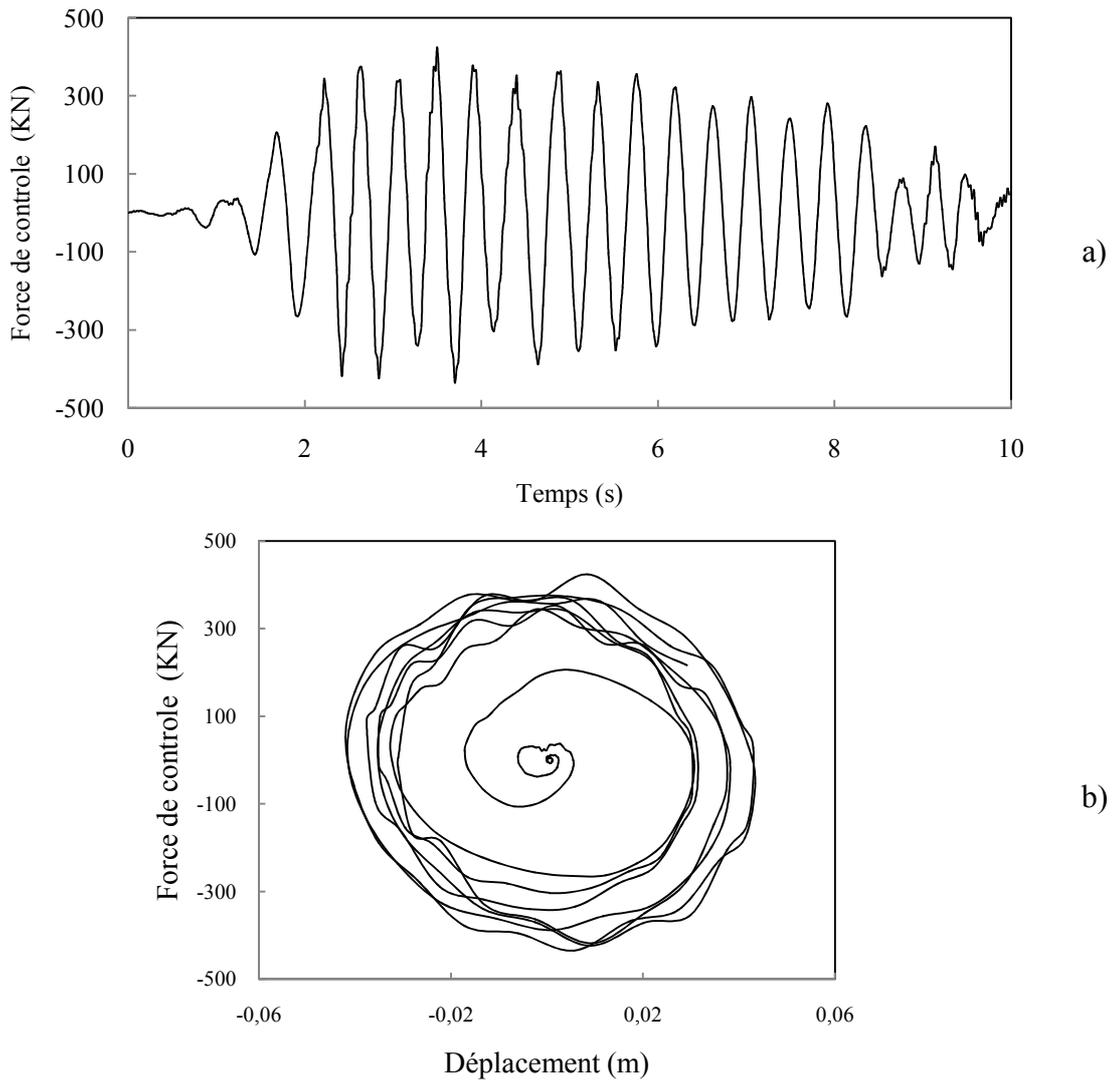


Figure 5.30. a) La force de contrôle et b) La relation force-déplacement du dernier étage du modèle étudié.

a).2. Structure à 06 étages

Dans cette application, le modèle choisi est une structure à 06 étages dont les caractéristiques sont données dans la figure 5.32. Alors que les données du sol sont présentées sur la figure 5.31.

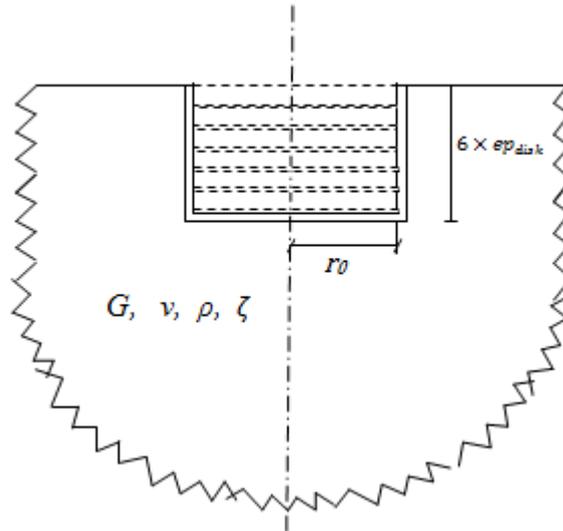


Figure 5.31. Le modèle du sol pour l'application numérique.

La zone du sol feuillé est divisée en 6 disques pour tous les modèles de sol étudiés. Tel que : $ep_{disk}=0.5$ m, $r_0=2$ m, $\nu=0.3$, $\rho=2000$ kg/m³, $\zeta= 5\%$ et le module de cisaillement $G=200$ MPa.

Le tableau 5.5 donne les résultats trouvés de la matrice de rigidité du sol $[\tilde{K}_{00}]$ pour les cinq valeurs du module de cisaillement G .

Tableau 5.5. La matrice de la rigidité du sol $[\tilde{K}_{00}]$.

$[\tilde{K}_{00}] = \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix}$		
A	B	C
6218382,38	-49735497,9	834328495

Tel que : $[\tilde{K}_{00}] = \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix}$.

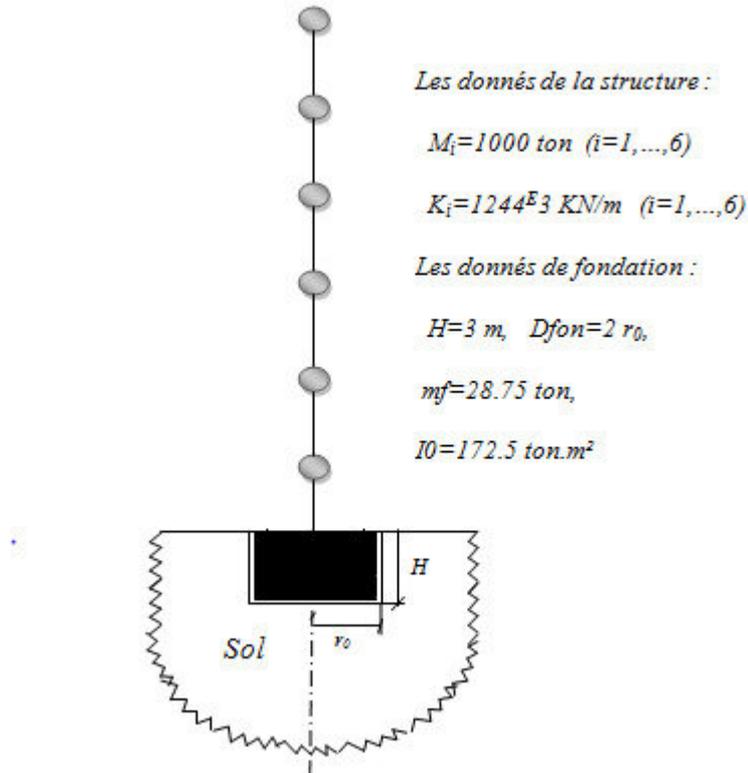


Figure 5.32. Le modèle de la structure étudiée.

Dans le tableau 5.6, on a donné les pulsations propres de la structure à 6 étages par les deux cas avec ISS et sans ISS (cas d'encastrement).

On remarque bien que les pulsations propres sont supérieures que celles du cas d'ISS

Tableau 5.6. Les pulsations propres pour différents sol en comparant avec le cas d'encastrement.

ETAGE	ISS	Encastré
1	8,30409401	8,50275004
2	23,9788841	25,0141012
3	39,1437385	40,0717237
4	51,9295625	52,8005233
5	62,0496758	62,4607484
6	68,3613801	68,4909818

On va contrôler cet exemple par un système actif de type tendon actif placé au premier étage. L'algorithme utilisé est l'algorithme GOAC. On va utiliser différentes valeurs des rapports S/R, pour trouver la valeur optimum du rapport S/R. Les résultats sont tracés dans la figure suivante.

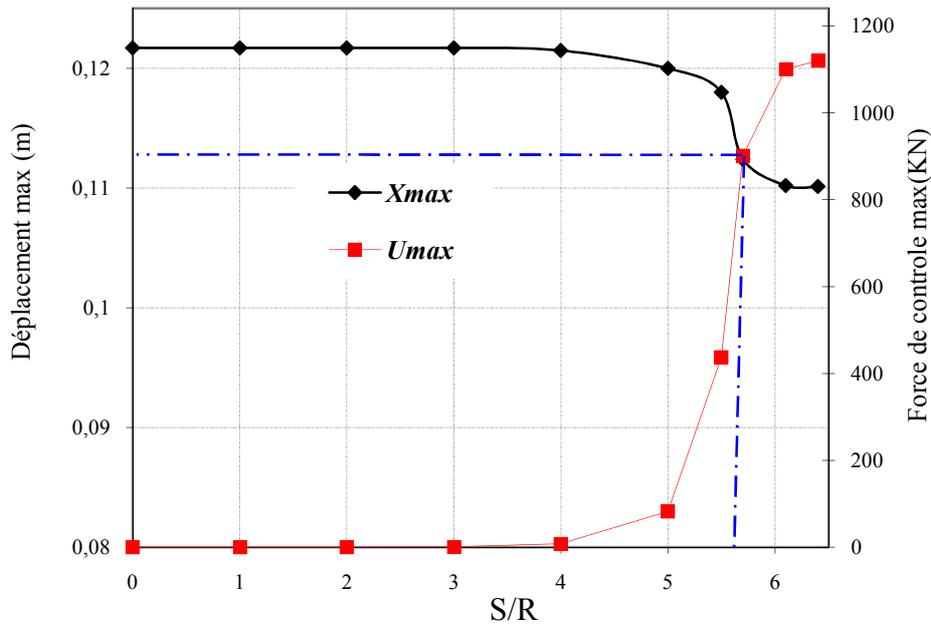


Figure 5.33. Le déplacement du dernier étage et la force de contrôle maximum pour différentes valeurs de S/R de la structure à 06 étages.

D'après la figure 5.33, la valeur choisit est $S/R=7^E5$.

La figure 5.34 suivante donne les résultats trouvés des déplacements, de vitesse et d'accélération maximum de tous les étages avec et sans contrôle en tenant compte de l'effet de l'ISS. Le cas sans ISS (encastrement) est aussi présenté sur la figure pour le besoin de comparaison.

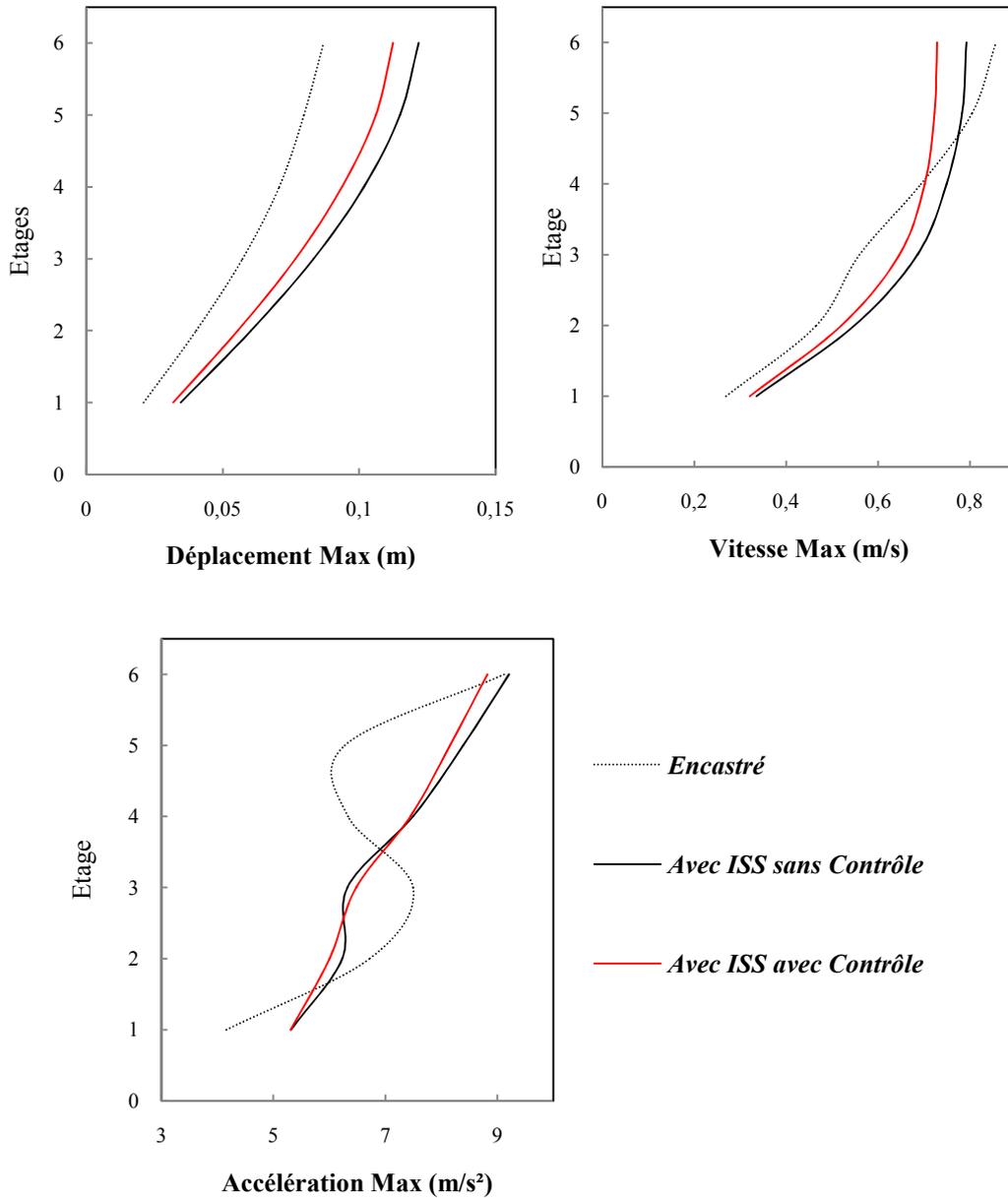


Figure 5.35. Le déplacement, la vitesse et l'accélération maximums des étages du modèle étudié avec et sans contrôle en tenant compte de l'effet de l'ISS en comparant avec le cas d'encastrement.

D'après la figure 5.34, on remarque que le déplacement diminue en présence du contrôle, ce qui résulte que le contrôle actif a un effet sur le déplacement, la vitesse et l'accélération.

La figure 5.35 suivante donne le déplacement, la vitesse et l'accélération du dernier étage en fonction du temps.

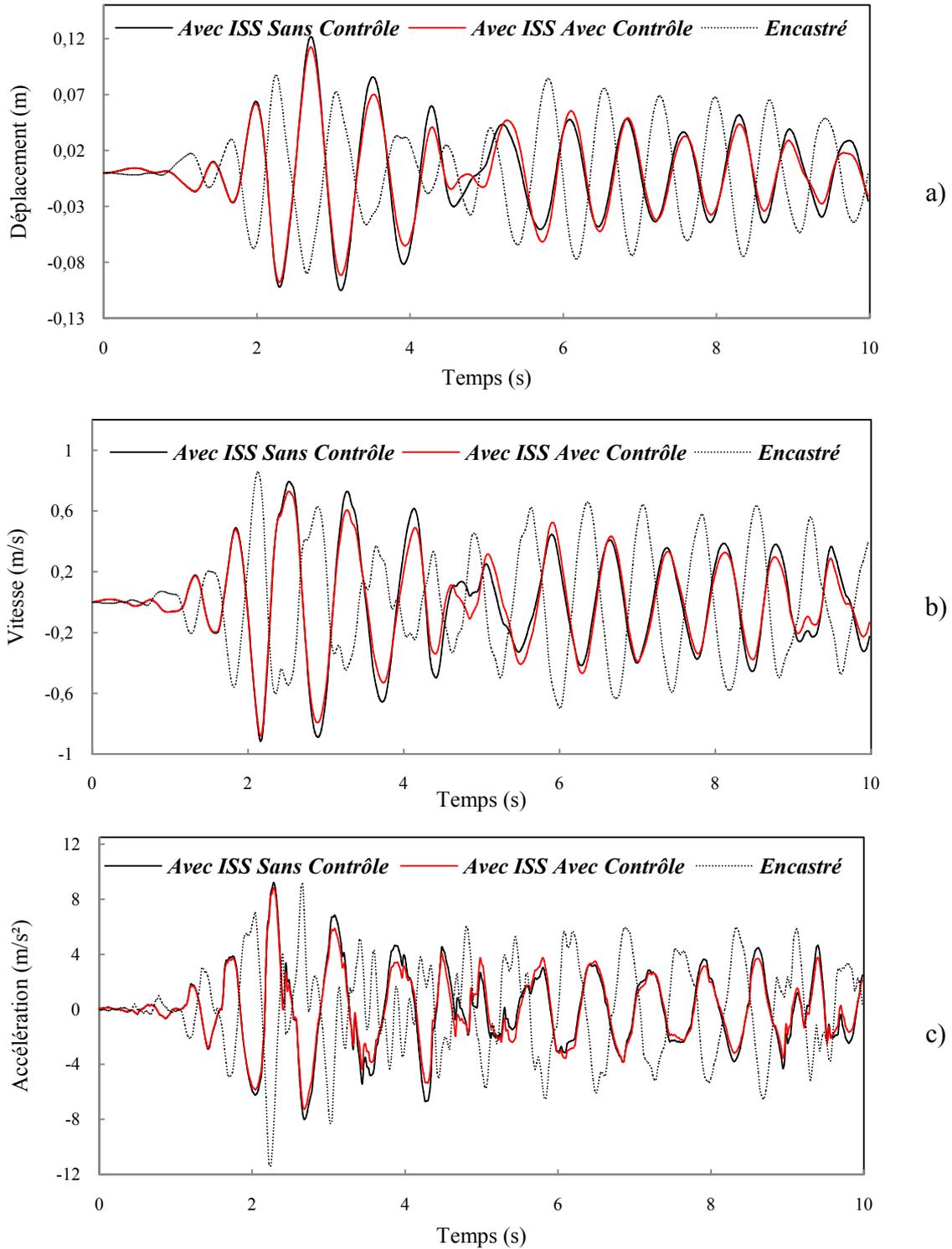


Figure 5.35. Le déplacement, la vitesse et l'accélération du dernier étage du modèle étudié avec et sans contrôle en tenant compte l'effet de l'ISS en comparant avec le cas d'encastrement.

On retrouve le même effet du contrôle sur le déplacement, vitesse et accélération.

La figure suivante donne l'évolution dans le temps de déplacement, vitesse, et accélération de la fondation.

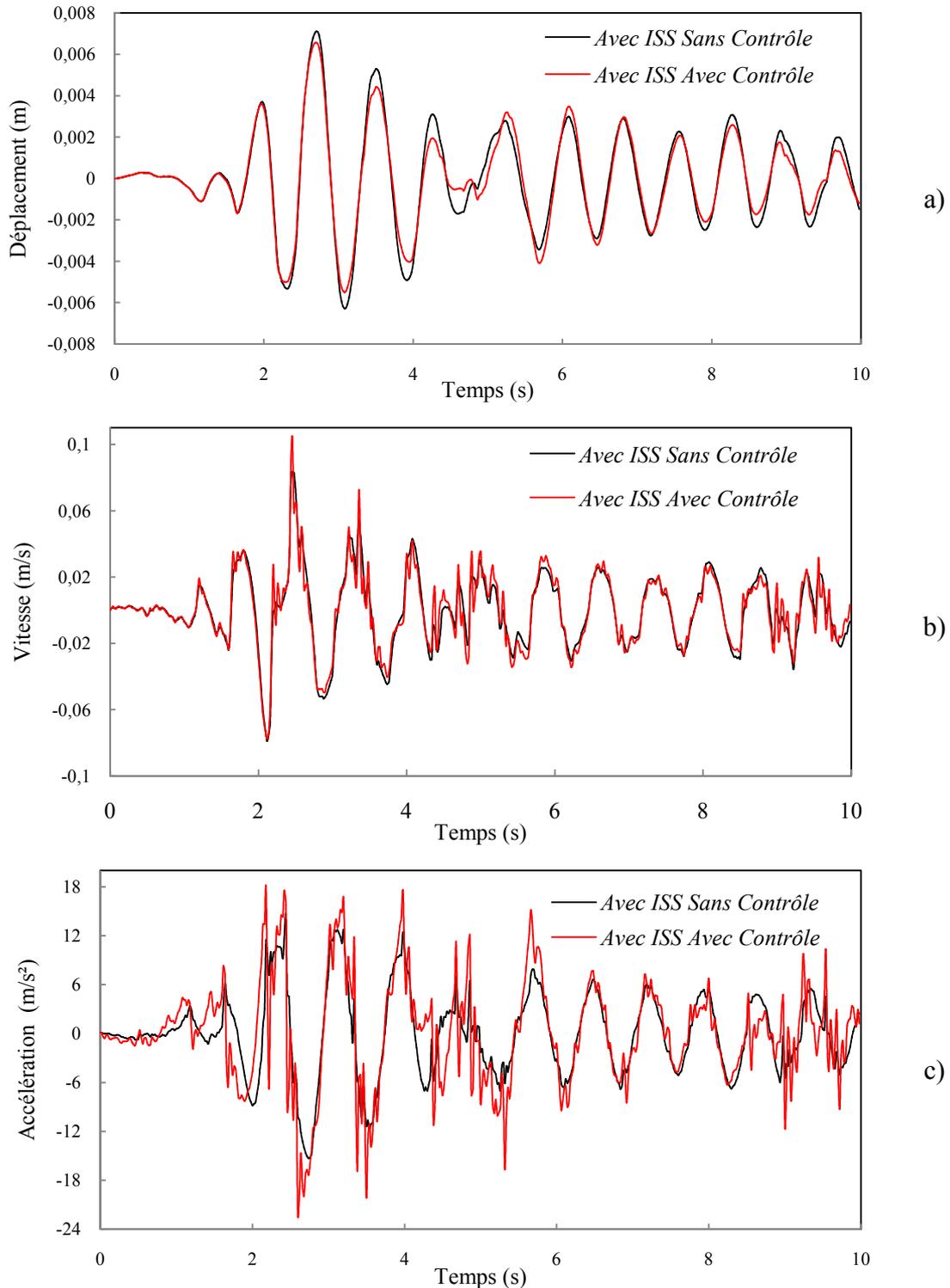


Figure 5.36. Le déplacement, la vitesse et l'accélération de la fondation du modèle étudié avec et sans contrôle.

La figure suivante donne la rotation, vitesse de rotation et accélération de rotation de la fondation avec et sans contrôle.

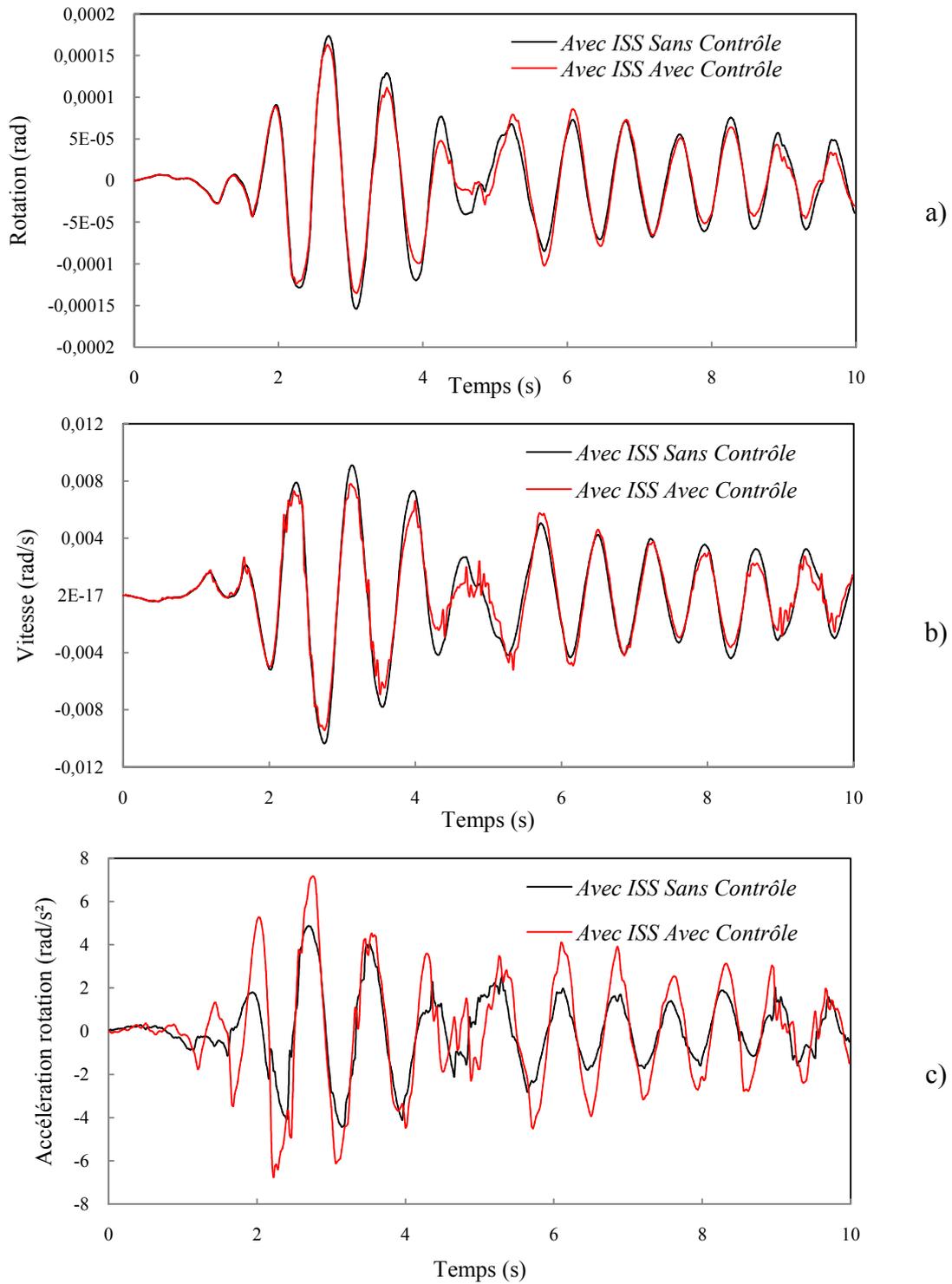


Figure 5.37. a) La rotation, b) la vitesse de rotation et c) l'accélération de rotation de la fondation du modèle étudié avec et sans contrôle.

En fin, on représente en figure 5.38 la variation de la force de contrôle en fonction de temps ainsi que la relation force déplacement du dernier étage.

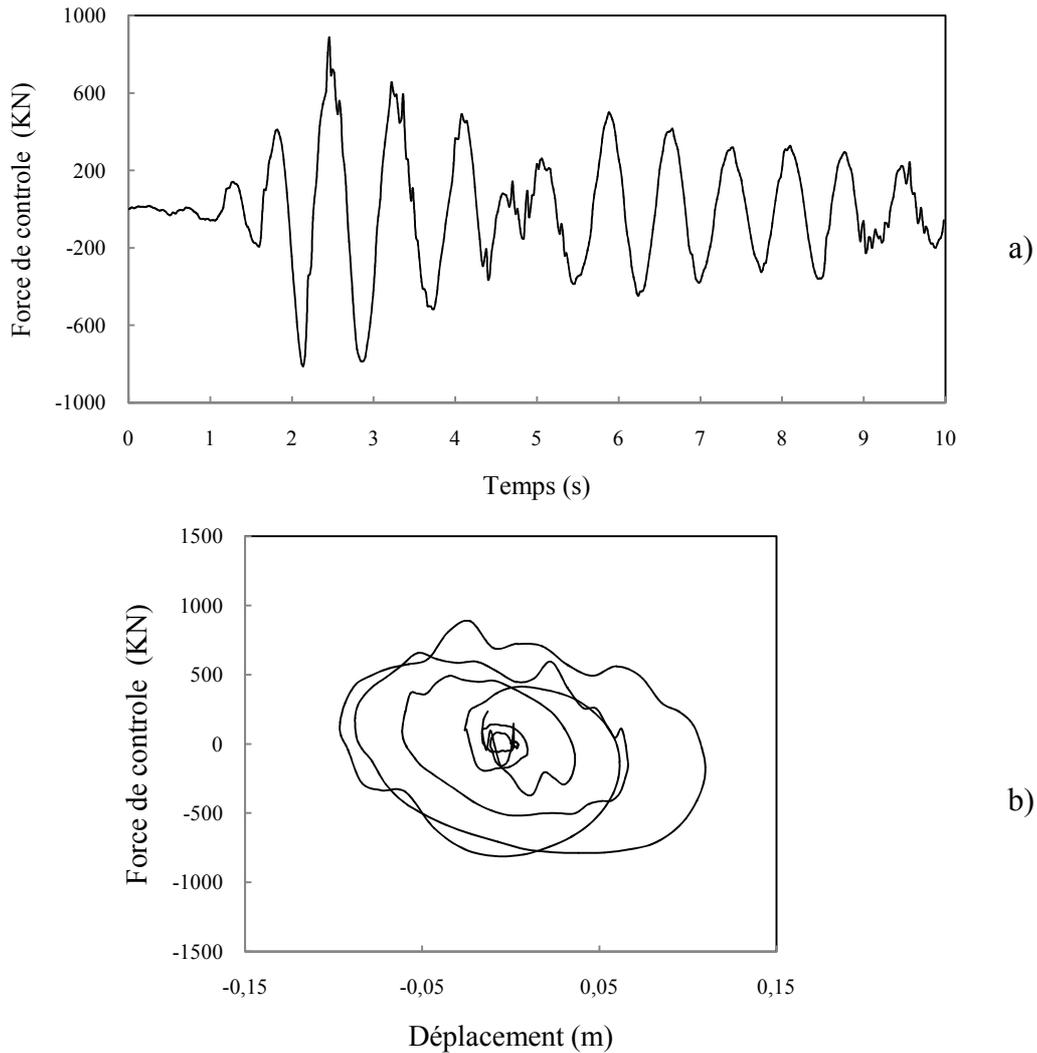


Figure 5.38. a) La force de contrôle et b) La relation force-déplacement du dernier étage du modèle étudié.

La figure 5.38 donne les résultats de force de contrôle, tel que la force de contrôle maximum est 900,21 kN.

b) Effet de la position des contrôleurs

b).1. Structure à 03 étages

On va utiliser dans cette application trois positions du contrôleur, position C : le system est placé au premier étage, position B : le système est placé au deuxième étage et la position A : le système est placé au dernier étage.

Les résultats trouvés de déplacement, de vitesse et d'accélération maximum des étages du modèle sont tracés dans la figure 5.39.

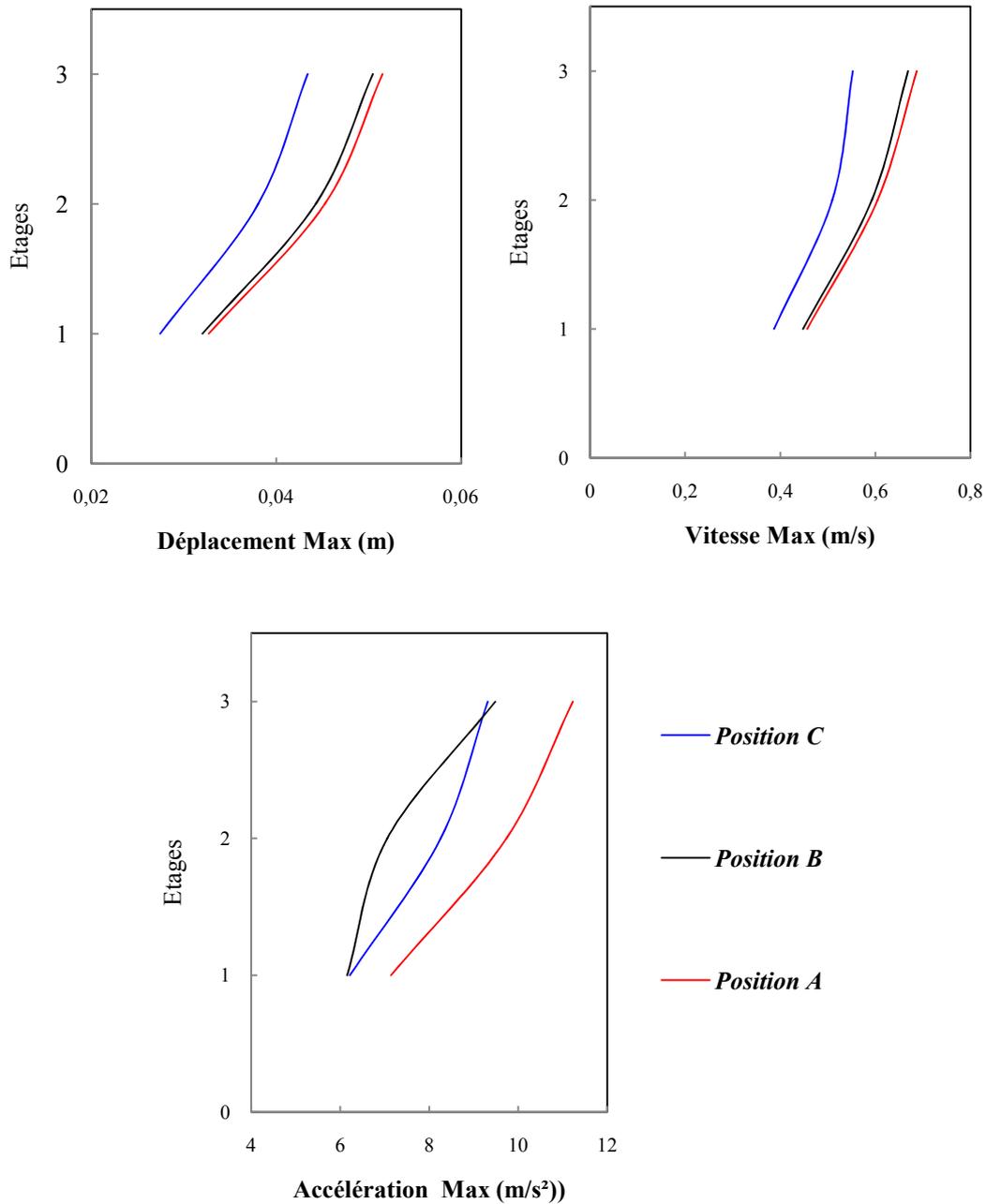


Figure 5.39. Le déplacement, la vitesse et accélération maximums des étages de l'exemple étudié.

D'après la figure 5.39 on remarque que la position des contrôleurs a une influence sur l'effet du contrôle, tel que la meilleure position dans ce modèle est la position C.

La figure suivante donne l'évolution dans le temps de déplacement du dernier étage et de la force de contrôle pour les trois positions.

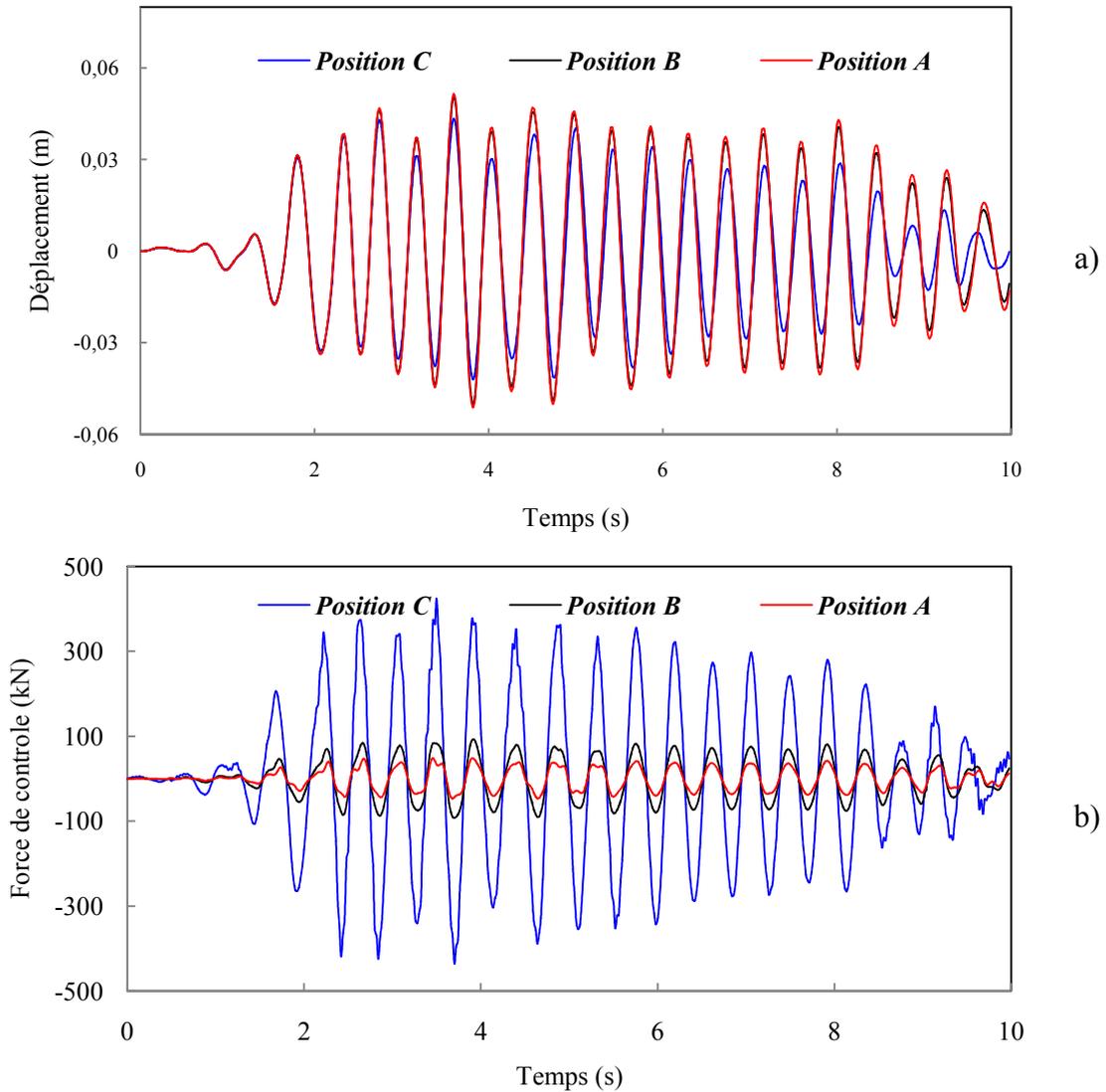


Figure 5.40. a) Le déplacement du dernier étage et b) la force du contrôle du modèle étudié pour les trois positions.

D'après la figure 5.40, le déplacement et la force de contrôle trouvés dans la position C montrent que le plus efficace dans ce modèle est de placer le contrôleur dans le premier étage si on a $NCR=1$.

A partir de cette application on remarque que la meilleure position des contrôleurs est au premier étage.

b).2. Structure à 06 étages

On va utiliser dans cette application trois positions du contrôleur, position C : le système est placé au premier étage, position B : le système est placé au troisième étage et la position A : le système est placé au dernier étage.

Les résultats trouvés de déplacement, de vitesse et d'accélération maximum des étages du modèle sont tracés dans la figure 5.41.

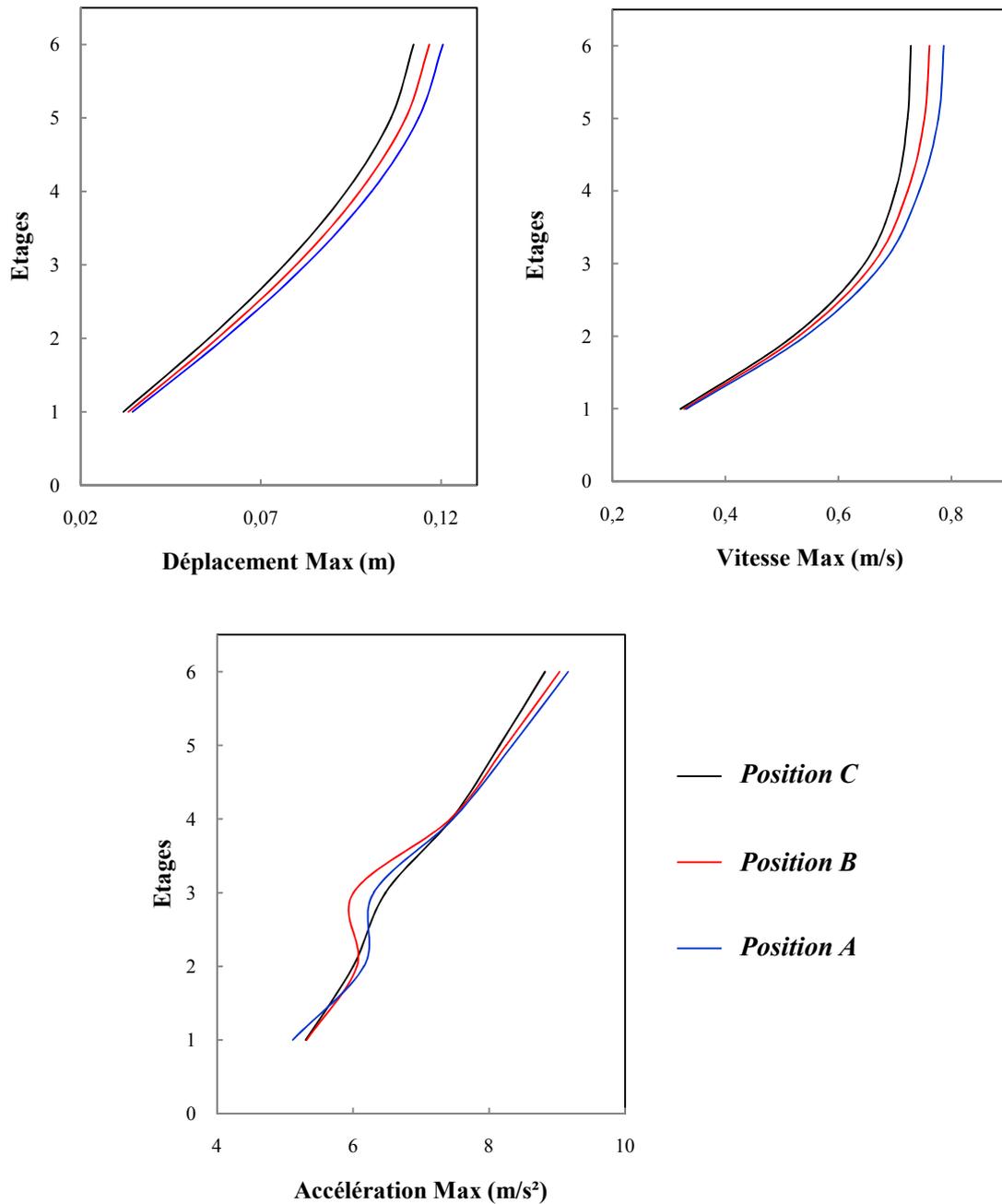


Figure 5.41. Le déplacement, la vitesse et accélération maximums des étages du modèle étudié.

D'après la figure 5.41 on remarque que la position des contrôleurs a une influence sur l'effet du contrôle, tel que la meilleure position dans ce modèle est la position C.

La figure suivante donne l'évolution dans le temps de déplacement du dernier étage et de la force de contrôle pour les trois positions.

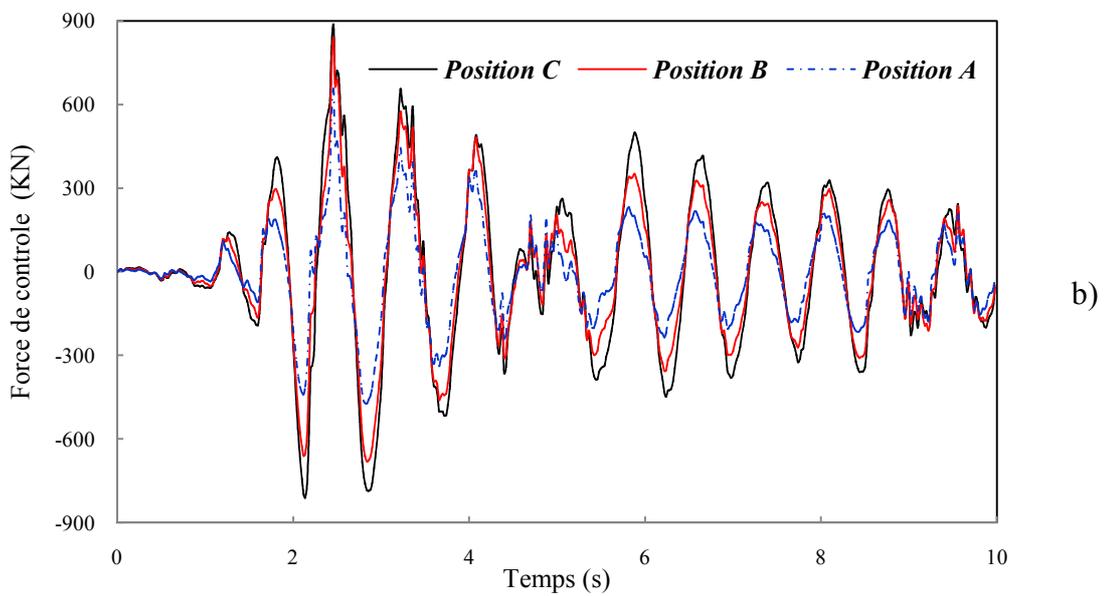
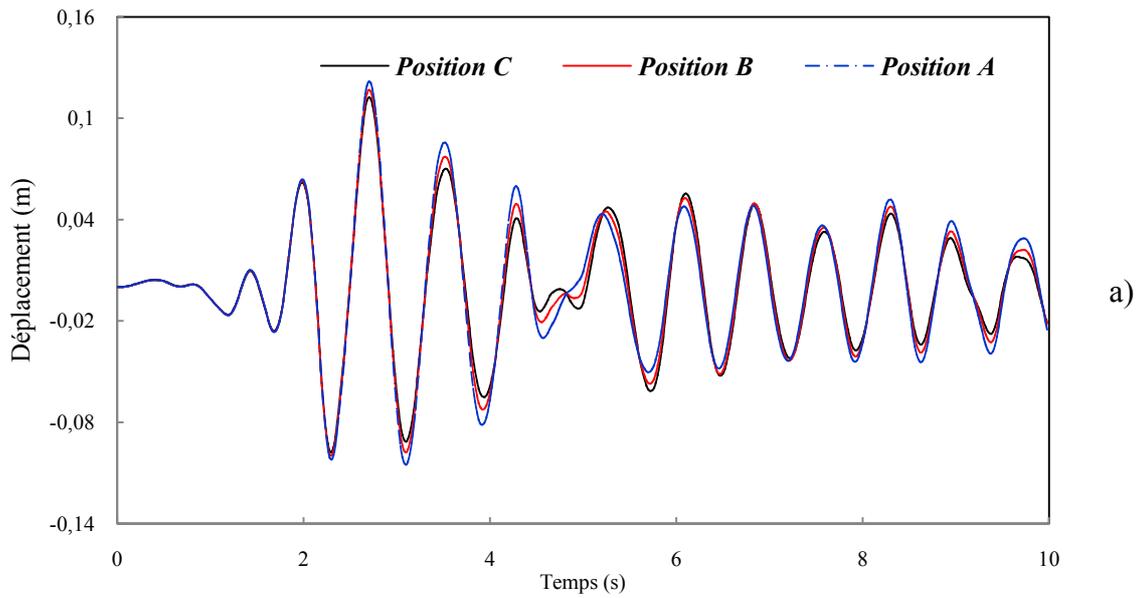


Figure 5.42. a) Le déplacement du dernier étage et b) la force du contrôle du modèle étudié pour les trois positions.

Et la figure 5.43 donne la relation force déplacement pour les trois positions.

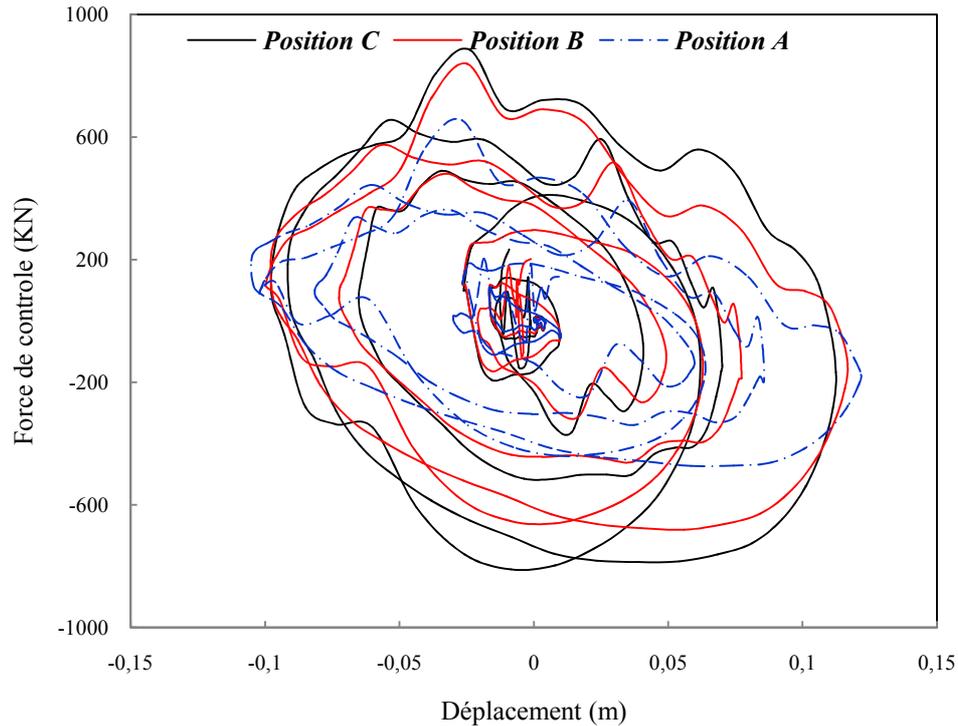


Figure 5.43. La relation force-déplacement du dernier étage du modèle étudié par les trois positions.

On remarque d'après la figure 5.43 que par la position C a le plus grand effet sur le déplacement et la plus grande force du contrôle par rapport aux position B et A, alors, la position C est plus efficace que les positions B et A, ainsi, la position B est plus efficace que la position A.

On conclut à partir de cette application que plusieurs paramètres influents sur l'efficacité du contrôle.

c) Effet du nombre des contrôleurs

c).1. Structure à 03 étages

On va étudier dans cette section l'influence du nombre des contrôleurs, tel que $NCR=1$ et $NCR=2$ et $NCR=3$. Le tableau suivant donne les positions des contrôleurs dans le modèle étudiée.

Tableau 5.7. Les positions des contrôleurs dans le modèle.

NCR	$NCR=1$	$NCR=2$	$NCR=3$
Étages contrôlés	1	1 et 2	1 et 2 et 3

Les résultats trouvés de déplacement, de vitesse et d'accélération maximum des étages du modèle sont tracés dans la figure 5.44 pour les trois positions.

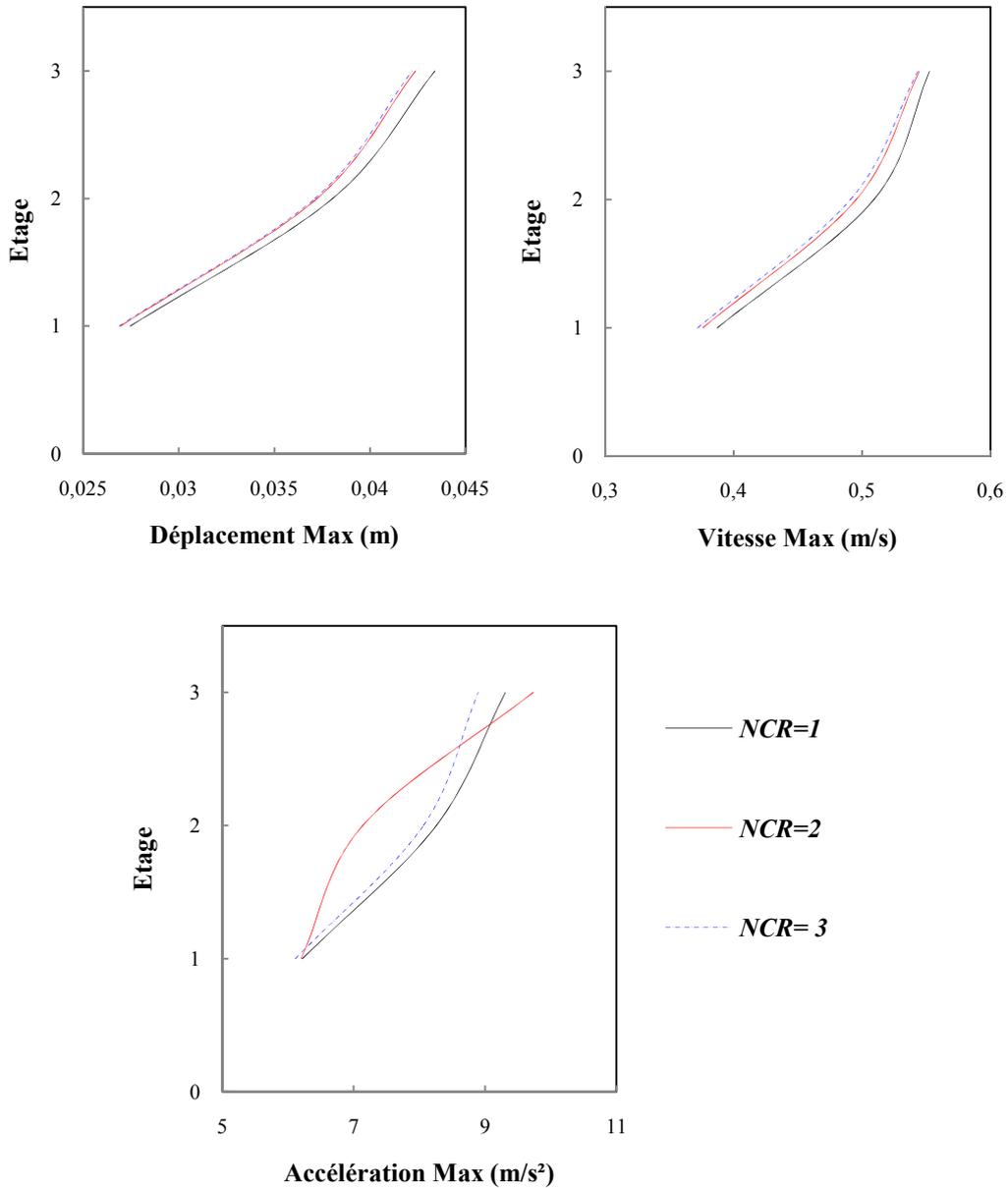


Figure 5.44. L'influence du nombre des contrôleurs sur le déplacement, vitesse et accélération maximum de la structure à 03 étages.

La figure 5.45 donne les résultats trouvés de la force de contrôle par les trois cas (NCR=1, NCR=2 et NCR=3).

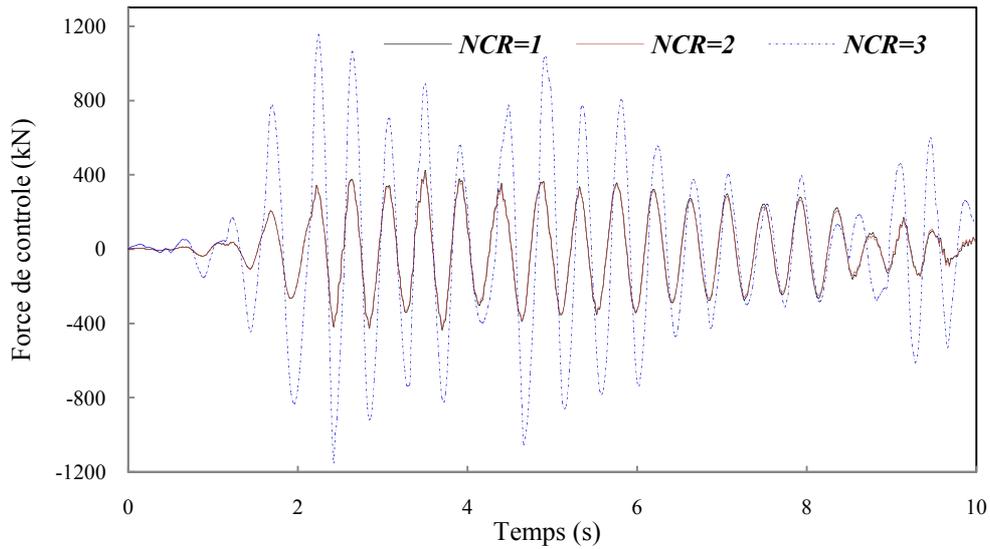


Figure 5.45. L'influence du nombre des contrôleurs sur la force de contrôle de la structure à 03 étages.

D'après la figure 5.44 on remarque que les résultats trouvés pour $NCR=1$ et $NCR=2$ sont presque les mêmes, dans le cas de $NCR=3$, il y a une diminution de déplacement plus grand par rapports aux deux autres.

A partir des deux cas ($NCR=1$ et $NCR=2$), on a conclut que n'est pas toujours intéressant d'augmenter le nombre des contrôleurs dans la structure. Et si on comparant les deux cas de $NCR=1$ et $NCR=3$, on conclut que le nombre des contrôleurs a une influence sur la réponse structurelle.

c).2. Structure à 06 étages

On va étudier dans cette section l'influence du nombre des contrôleurs, tel que $NCR=1$ et $NCR=3$ et $NCR=6$. Le tableau suivant donne les positions des contrôleurs dans le modèle étudiée.

Tableau 5.8. Les positions des contrôleurs dans la structure à 06 étages.

NCR	$NCR=1$	$NCR=3$	$NCR=6$
Étages contrôlés	1	1 et 2 et 3	Touts les étages

Les résultats trouvés de déplacement, de vitesse et d'accélération maximum des étages du modèle sont tracés dans la figure 5.46 pour les trois choix.

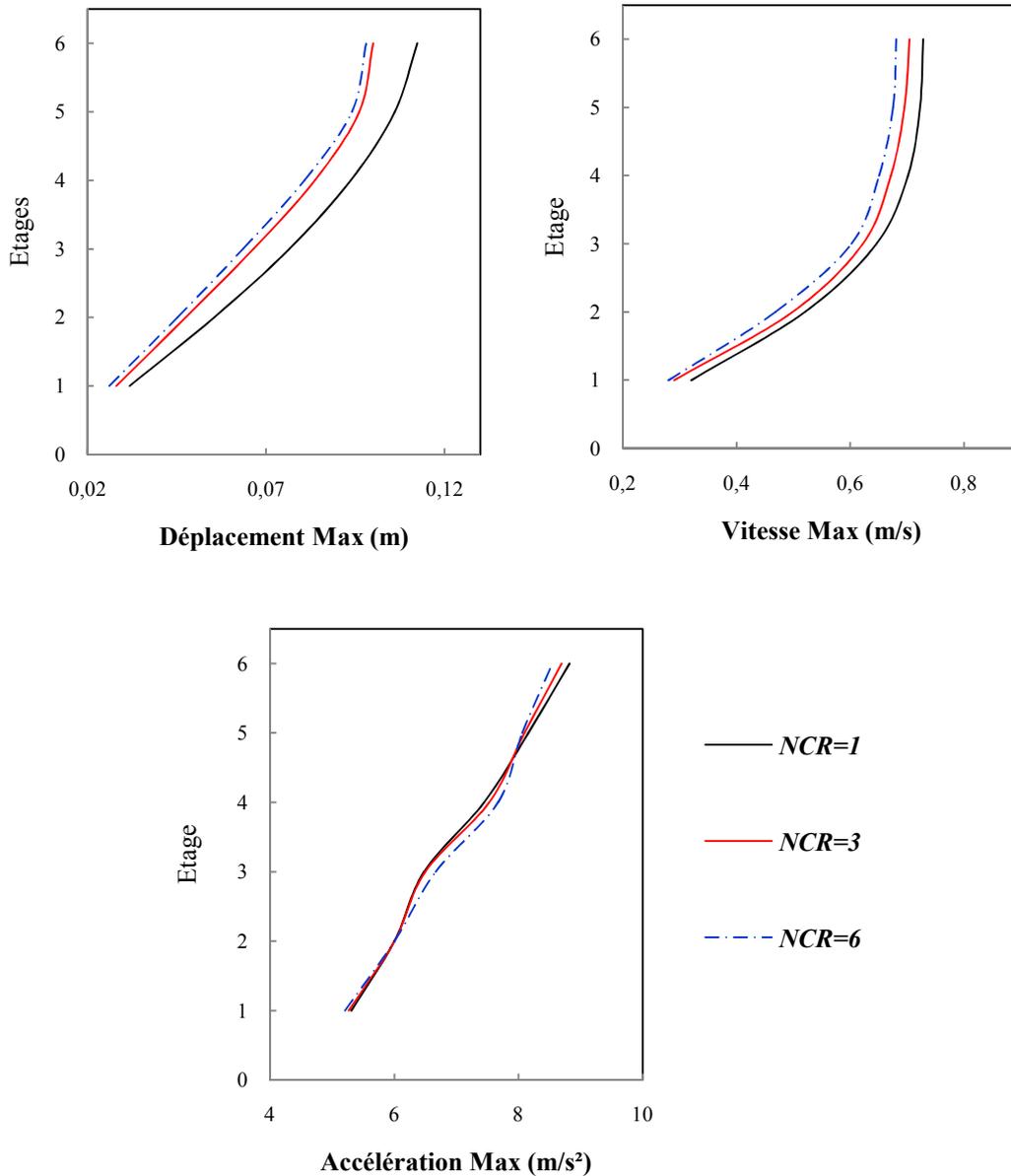


Figure 5.46. L'influence du nombre des contrôleurs sur le déplacement, vitesse et accélération maximum de la structure à 06 étages.

Le nombre des contrôleurs jouent un rôle important dans le contrôle des structures.

5.4 Conclusion

D'après toutes les applications faites dans ce chapitre, on a conclut que soit dans le cas d'encastrement soit dans le cas d'ISS, le contrôle actif à un grand effet sur la réponse structurelle.

On a vérifié l'efficacité de l'algorithme développé GOAC en comparant avec les deux algorithmes ROAC et IOAC par des simulations numériques faites sur des structures encastrees.

D'après les résultats trouvés pour la position des contrôleurs et les recherches faites pour un modèle encastré le bon choix est de placer les contrôleurs au dernier étage. Mais pour le cas d'ISS, on a trouvé le bon choix est de placer les contrôleurs en bas, ou on peut dire à côté de la fondation. Alors, on ne peut pas négliger l'effet de l'ISS dans le choix de la position des contrôleurs.

CONCLUSION GENERALE

Les structures actuelles, en génie civil, deviennent de plus en plus complexes nécessitant des techniques modernes pour la compréhension et la maîtrise de leur comportement. Ces structures, lorsqu'elles sont soumises à des sollicitations dynamiques, tels que les seimes ou les vents forts, peuvent subir des vibrations très importantes les conduisant souvent à la ruine. Bien que plusieurs efforts ont été conduits pour bien concevoir des structures résistantes à ce type de sollicitation, voir les nombreux codes développés dans ce domaine, ces structures restent très vulnérables rendant leur capacité de résister et de dissiper l'énergie très limitée.

Dans le concept utilisé, actuellement dans les différents codes, les structures s'appuient uniquement sur leur propre rigidité pour résister aux forces dynamiques et sur leur type de matériau, qui est généralement de faible amortissement, pour dissiper l'énergie dynamique. Ce concept ne permet pas aux structures de changer ou de s'adapter aux variations aléatoires des sollicitations dynamiques. Dès qu'il y a augmentation de la sévérité des séismes, les concepteurs ont tendance automatiquement à augmenter les sections et/ou prévoir des matériaux plus ductiles ce qui n'est pas souvent très économique.

Ce comportement sera encore plus compliqué si on sait que les structures sont fondées sur des sols par lesquels sont transmises les sollicitations appliquées, tenant ainsi en compte le fonctionnement de l'ensemble du système sol-structure, ce phénomène est désigné sous le nom « Interaction Sol-Structure (ISS) ».

Ainsi, en génie parasismique, le défi actuel majeur est de trouver de nouvelles techniques permettant aux structures de résister au mieux aux séismes tout en optimisant leur section. La solution utilisée ces dernières années est celle des structures dites « *intelligentes* », reposant sur l'utilisation de matériaux intelligents et/ou sur des systèmes dits *adaptatifs* qui peuvent facilement s'adapter à tout changement de sollicitations. Ces types de structures utilisent non seulement leur propre rigidité et amortissement mais peuvent aussi compter sur les systèmes « intelligents » ajoutés pour résister aux sollicitations dynamiques.

Pour comprendre ce phénomène, appelé aussi contrôle des structures, et dans le cadre de ce mémoire, une riche étude numérique a été menée sur des structures de type poteaux-poutres. Pour ce faire, le travail a été élaboré en deux grandes parties :

- Nous avons d'abord commencé par présenter une étude bibliographique détaillée sur les structures intelligentes et les types de contrôle existants tout en passant par une description détaillée du phénomène de l'interaction sol-structure et de ses différentes méthodes de calcul.
- Ensuite, un programme sous MATLAB a été développé et utilisé pour comprendre le comportement dynamique des structures intelligentes en tenant compte de l'effet de l'interaction sol-structure. Une étude numérique a été donc menée pour voir l'influence de certains paramètres clés sur ce comportement.

A la base de ce travail, les conclusions les plus intéressantes, à tirer, peuvent être comme suit :

1. Le programme élaboré permet de traiter des structures poteaux-poutres pour n'importe quel nombre d'étage et de tendon actif, en tenant compte de l'ISS ou non (cas d'encastrement parfait), avec ou sans contrôle. Il permet aussi de choisir parmi les trois algorithmes de contrôle les plus utilisés, ROAC, IOAC et GOAC.
2. Dans tous les exemples traités, on a montré que le control actif a un grand effet sur la réponse structurelle, avec ou sans ISS. Le déplacement du aux sollicitations dynamiques est généralement très réduit.
3. En cas de présence de contrôle, les rapports Q/R et S/R ont une grande influence sur l'efficacité du contrôle. Le déplacement structurel maximal et la force de contrôle en dépendent.
4. Des trois algorithmes proposés, les déplacements sont plus importants (force de contrôle moins importante) dans le cas de ROAC que ceux des algorithmes IOAC et GOAC.
5. Les déplacements, vitesses et accélérations sont très sensibles à l'incrément du temps « Δt » pour l'algorithme IOAC alors qu'ils sont indépendants de « Δt » pour l'algorithme GOAC.
6. La position du (ou des) tendon(s) a une grande influence sur les déplacements structuraux. Pour un seul tendon, cette position est beaucoup plus intéressante vers le sommet que vers le bas pour les structures sans ISS et plus intéressante vers le bas dans le cas avec ISS.
7. Le phénomène de l'ISS influe directement sur le déplacement structurel maximal et par la suite sur la force de contrôle. Les déplacements augmentent généralement par rapport au cas d'encastrement parfait.
8. Le choix du nombre de contrôleurs influe directement sur les réponses dynamiques, néanmoins il faut bien choisir leurs positions

Enfin, on peut dire que la revue bibliographique présentée et le programme élaboré peuvent constituer une base de travail intéressante pour la suite des travaux de recherche. En effet, plusieurs problèmes dans le domaine du comportement, de la modélisation et de la conception des structures intelligentes en tenant compte de l'ISS restent posés aujourd'hui. On ne peut donc terminer sans évoquer les développements qui pourraient faire suite à ce travail, on peut citer :

1. Prendre en considération les autres types de contrôle surtout le contrôle hybride qui peut avoir un grand effet sur les déplacements structuraux.

2. Considérer les autres types de structures, autres que les poteaux-poutres, pour voir l'influence, des voiles par exemple, sur les réponses dynamiques des structures contrôlées.
3. Améliorer le programme élaboré en considérant le cas général des éléments finis. Tout type d'élément fini peut être considéré, le développement matriciel permet cette généralisation.
4. Prendre en compte la non linéarité des différents contrôleurs ajoutés aux structures.

Il ya surement d'autres sujets plus complexes et intéressants qui nécessitent l'exploration et un grand challenge est lancé actuellement pour la compréhension et la maîtrise des structures contrôlées.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **AKHRAS. G, 2000** : Des matériaux intelligents et des systèmes intelligents pour l'avenir, Revue militaire canadienne, Automne 2000 ;
- [2] **Anh-Lam Do, Jorge de JesusLozoya-Santos, Luc Dugard, Olivier Sename, Ricardo Ambrocio Ramirez-Mendoza & Ruben Morales-Menendez, 2010** : Modélisation et commande LPV d'un amortisseur magnéto-rhéologique : (Sixième Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2010), Nancy : France) ;
- [3] **BEN MEKKI. O, 2006** : Amortissement semi-actif des structures flexibles : présentée à L'Université à degli Studi di Roma "Tor Vergata" et du diplôme de docteur de l'école nationale des ponts et chaussées ;
- [4] **BOSENS. F, 2001** : Amortissement actif des structures câblées : de la théorie à l'implémentation : Thèse de doctorat en Sciences Appliquées Laboratoire des Structures Actives Département des constructions mécaniques et de robotique ;
- [5] **Bossis. G, E Coquelle, O Volkova, C. Noël, A-M Chaze, F Giulieri & J. Persello** : Matériaux composites adaptatifs ;
- [6] **CUMUNEL. G, 2008** : Extensomètres à fibre optique Longue Base (ELB) pour l'évaluation dynamique des structures : Thèse De Doctorat pour l'obtention du diplôme de Docteur De l'école nationale des ponts et chaussées spécialité : Structure et Matériaux ;
- [7] **Cheng. F.Y & all, 2008** : Smart structures Innovative systems for Seismic Response control, Taylor and Francis grup ;
- [8] **Chaiviriyawong. P. & W. Prachaseree** : Applications of passive mass dampers for civil engineering structural control: a review ;
- [9] **Contrôle vibratoire des passerelles piétonnes Guide de dimensionnement, Humaninduced Vibrations of Steel Structures RFS2-CT-2007-00033** ;
- [10] **Connor. J. J, 2002** : Introduction To Structural Motion Control, by Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458 ;
- [11] **Cheng. F. Y. & al, 1991** : Generalized Optimal Active Control Algorithm Of Seismic Structures And Related Soil-Structure Formulation : in Computational mechanics in structural engineering recent developments and future trends : Cheng, F.Y. and Fu, Z.Z. (eds), Elsevier Applied Science, London ;
- [12] **Chih-Chen Chang & Lung-On Yu** : A simple optimal pole location technique for structural control : : Department of Civil and structural engineering. The Hong Kong University of science and Techology ;
- [13] **Cheng. F. Y., 2000** : Generalized optimal active control algorithm for seismic-resistant structures with active and hybrid control : International Journal of Computer Applications in Technology, Volume 13;
- [14] **CHOMETTE. B., 2008** : Contrôles modaux actif, semi-adaptif et semi-actif de structures intelligentes embarquées Application aux cartes électroniques : thèse de doctorat, école doctorale : MEGA, Spécialité génie mécanique, l'Institut national des

sciences appliquées de Lyon ;

- [15] **Chae-Wook Lim, 2008** : Active vibration control of the linear structure with an active mass damper applying robust saturation controller (Mechatronics journal ISSN 0957-4158), Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, San 16-1. DuckMyoung-Dong, Yuseong-Gu, Daejon 305-719, COREE, REPUBLIQUE DE;
- [16] **Dalmer. F, W. Fiebig & J. Rabięga**, Reduction of Vibration Levels on Pedestrian Bridges by Tuned Mass Dampers Project Example – The “ZabiaKladka” Bridge / Wroclaw ;
- [17] **DEBBABI. M, 2009** : Sur le contrôle semi-actif des vibrations élastiques d’une grande structure souple, thèse de doctorat présenté à l’université degli studi di roma "Tor Vergata";
- [18] **DE BOE. P, 2003** : Les éléments piézo-laminés appliqués à la dynamique des structures : Thèse de doctorat université de liège faculté des sciences appliquées ;
- [19] **ELSOUFI. L, 2009** : Contribution à la fabrication des structures thermoplastiques actives, thèse de doctorat : préparé au laboratoire M3M (Mécatronique/Méthodes-Modèles-Métiers) de l’université de technologie de Belfort-Montbéliard;
- [20] **FEST. E, 2003** : Une structure active de type tensegrité : thèse de doctorat présentée à la faculté environnement naturel, architectural et construit section de génie civil, école polytechnique fédérale de LAUSANNE ;
- [21] **Farahmand Azar B & al. 2011** : Seismic mitigation of tall buildings using magnetorheological dampers, in asian journal of civil engineering (Building And Housing) VOL. 12, NO. 5 (2011) pages 637-649;
- [22] **Grange. S., 2008** : Modélisation simplifiée 3D de l’interaction sol-structure : application au génie parasismique, thèse de doctorat, institut polytechnique de Grenoble ;
- [23] **Hubbard. J. E., Jr. 2010** : Spatial Filtering for the Control of Smart Structures : (An Introduction) ;
- [24] **Ho Chey. M., 2007** : Passive And Semi-Active Tuned Mass Damper Building Systems, these de doctorat, university of Canterbury, Christchurch, New Zealand ;
- [25] **JULLIERE. B, 2006** : Contrôle actif à l’aide de piézo-composites des déformations induites thermiquement dans les matériaux composites : Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l’Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie mécanique pour l’obtention du grade de maîtresses sciences (M.Se.) ;
- [26] **Jassemi-Zargani. R & all, 1999** : Utilization of Smart Structures In Enhanced Satellites, in *smart materials and structures*, canadian space agency, St-Hubert, Quebec, Canada, (2nd CanSmart Workshop 1999);
- [27] **Julich Saavedra. A. S, 2006** : Contrôle de la forme de passerelle composite, thèse de doctorat, Ecole des Ponts ParisTech ;
- [28] **JEAN. P, 2006** : Isolation vibratoire par contrôle semi-actif d’amortisseurs magnéto-rhéologiques pour l’interface lanceur/charge utile Thèse de doctorat du Conservatoire National des Arts et Métiers (Spécialité Mécanique) ;

- [29] **John P. Wolf & Andrew J. Deeks, 2004** : Foundation Vibration Analysis : A Strength-of-Materials Approach (ISBN 0 7506 6164 X), Printed and bound in Great Britain by Biddles, Kings Lynn (Designs and Patents Act 1988);
- [30] **Jerome Peter Lynch, 2002** : Decentralization Of Wireless Monitoring And Control Technologies For Smart Civil Structures (of stanford university in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy);
- [31] **Khac Hoan. P, 2010** : Vulnérabilité Et Spectres De Plancher Des Structures Sismiquement Isolées : thèse de doctorat de l'école polytechnique Domaine Mécanique Spécialité Dynamique des structures ;
- [32] **Kutanis. M. & M. Elmas, 2001** : Non-linear Seismic Soil-Structure Interaction Analysis Based on the Substructure Method in the Time Domain, in Journal of Structural Engineering Vol. 25, 617-626;
- [33] **Lanticq. V** : Mesure répartie de température et de déformations par diffusion Brillouin : de la fibre optique au capteur pour le génie civil ;
- [34] **Lynch. J. P., 1998** : Active Structural Control Research at Kajima Corporation (The National Science Foundation's Summer Institute in Japan Program), Ph.D. Candidate (jplynch@stanford.edu) Department of Civil and Environmental Engineering Stanford University ;
- [35] **Monner. H. P, 2005** : Smart materials for active noise and vibration reduction(German Aerospace Center (DLR), Institute of Composite Structures and Adaptive Systems, Lilienthalplatz 7, D-38108 Brunswick, Germany);
- [36] **Mazars. J, 2011** : LE RISQUE SISMIQUE : Les séismes et leurs effets – La construction parasismique ;
- [37] **MEINHARDT. C, O. DRESSEN & F. DALMER, 2008** : Increase of the structural damping due to the application of tuned mass dampers TMD subject to the footbridge construction, 3rd international conference, footbridge 2008;
- [38] **Maebayashi. K., K.Shiba, A.Mita & Y.Inada, 1992** : Hybrid mass damper system for response control of building ;
- [39] **Matinmanesh. H. & M. Saleh Asheghabadi, 2011** : Seismic Analysis on Soil-Structure Interaction of Buildings over Sandy Soil :The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction) ;
- [40] **NAWROTZKI. P., 2008** : Tuned-Mass Systems For The Dynamic Upgrade Of Buildings And Other Structures: Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-11) “Building a Sustainable Environment” ;
- [41] **OTANI. S, A.WADA, Y.KITAGAWA, T.FUJITA, M.IDORIKAWA, M. IIBA & M.TESHIGAWARA, 2004**: Research And Development On Smart Structural Systems : *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3 (Special Issue), In U.S.-Japan Cooperative Structural Testing Program ;
- [42] **Oudjene. M. & al, 2005** : Influence de la catégorie de site sur le comportement sismique des structures rigides ; Application des règles parasismiques algériennes 99 (RPA99) ;
- [43] **Preumont. A, 2011** : Vibration Control of Active Structures: An Introduction Third Edition ;

- [44] **Ranjan Vepa, 2010** :Dynamics of smart structures :John Wiley & Sons Ltd ;
- [45] **REECE. P. L, 2006** : Smart Materials and Structures: New Research: (Published by Nova Science Publishers, Inc. New York);
- [46] **Richard E. Christenson, B.S, 2001** : Semi-active Control Of Civil Structures For Natural Hazard Mitigation: Analytical And Experimental Studies A Dissertation Submitted to the Graduate School of the University of Notre Dame in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of hilosophy by Department of Civil Engineering and Geological Sciences Notre Dame, Indiana ;
- [47] **RIZET. N.,1999** : Contrôle actif des vibrations utilisant des matériaux piézo-électrique : l'institut national des sciences appliquées de LYON;
- [48] **SAHLI. M. L., 2009** : Modélisation et contrôle de sante des matériaux composites hybrides à propriétés adaptables : matériaux intelligents, sous l'effet des efforts extérieurs : thèse de doctorat en sciences en génie mécanique option construction, université Mentouri Constantine, faculté de sciences de l'ingénieur, département de génie mécanique ;
- [49] Smart Materials and Related Structures : the technology programme (NOVEMBER 2004 COMPETITION FOR FUNDING)
- [50] Seismic Isolation for Buildings and bridges : The best earthquake ProtectionTechnology in the world Dynamic isolation systems 885 Denmark Drive, Suite 101; **McCarran, Nevada 89434 USA**: www.dis-inc.com ;
- [51] **SLEIMAN. H, 2010** : Systèmes de suspension semi-active à base de fluide magnétorhéologique pour l'automobile : Thèse de doctorat ;
- [52] **Spencer. B. F., 2008** : Structural Control in Honor of Takuji Kobori : The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China;
- [53] **SEGHIR. A., 2011** : Contribution à la modélisation numérique de la réponse sismique des ouvrages avec interaction sol-structure et interaction fluide-structure : Application à l'étude des barrages poids en béton, Thèse de doctorat ;
- [54] **Steven L Kramer, 1996** : Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey;
- [55] **Shakibet. H. & A. Fuladgar, 2004** : Dynamic soil-structure interaction effects on the seismic response of asymmetric buildings;
- [56] **TRINDADE. M. A, 2000** : Contrôle hybride actif- passif des vibrations de structures par des matériaux Piézoélectriques et viscoélastiques : Poutres sandwich/multicouches intelligentes, Thèse de doctorat, conservatoire national des arts et métiers ;
- [57] **TRINDADE. M. A, 2000** : Contrôle hybride actif- passif des vibrations de structures par des matériaux Piézoélectriques et viscoélastiques : Poutres sandwich/multicouches intelligentes ;
- [58] **Tamahoult. M. & t. Branci** : Influence de l'interaction sol-structure sur la réponse dynamique des structures des bâtiments ;
- [59] **T. T. Soong, 1990** : Active Structural Control : Theory and Practice, 1st edn, Longman Scientific & Technical, UK and John Wiley & Sons, New York, (ISBN 0-470-21670-

0);

- [60] **Wang. Y. & K. H. Law, 2012** :Wireless Sensor Networks in Smart Structural Technologies ;

WEBOGRAPHIE

- [61] Smart Structures And Materials : <http://strlab.iitd.ac.in/SSDL/smart.pdf> ;
- [62] **H. P. Monner & P. Wierach** : Overview of smart-structures technology at the German Aerospace Center :German Aerospace Center (DLR), Institute of Composite Structures and Adaptive Systems, http://www.dlr.de/fa/Portaldata/17/Resourcen/dokumente/publikationen/2005/16_monner.pdf;
- [63] Smart Materials : Mechanical | Mechatronics Seminar Topic (Techalone.com) ;
- [64] http://webdocs.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mems/sma.html ;
- [65] <http://www.tema-concept.com/secteurs/le-genie-civil.html>;
- [66] http://mapage.noos.fr/boris.w/en_construc/film_design_para.swf;
- [67] http://www.ihl.co.jp/iis/english/products/damper_mass.html;
- [68] <http://seismes-projet-tpe.e-monsite.com/pages/ii-prevention/2-isolation-parasismique.html>;
- [69] **Guizani. L.** : Isolation sismique et technologies parasismiques pour les ponts au Québec : Mise au point, http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librairie/Publications/fr/ministere/recherche/14colloque/9_mai_14h30.pdf ;

RESUME

Dans Cette étude, on s'intéresse à deux domaines différents et très importants dans la construction en génie civil, le domaine des structures intelligentes et le domaine d'interaction sol structure.

Dans une première partie, on a présenté une analyse bibliographique détaillée sur les structures intelligentes ainsi que les différents types de contrôle. Cette partie a été suivie par un exposé détaillé de phénomène d'interaction sol-structure et de ces différentes méthodes de calcul.

Pour cela, un programme a été élaboré sous MATLAB permettant l'analyse de structures intelligentes de type poteau-poutre en tenant compte de l'interaction sol-structure.

L'étude numérique menée, par la suite, nous a permis de comprendre l'effet de l'ISS ainsi que le rôle et l'importance du contrôle structurel.

Mot clés : Contrôle, Intelligente, Interaction, Sol-structure.

ABSTRACT

In this study, we look at two very different and important domain in construction of civil engineering, the domain of smart structures and soil structure interaction domain.

In the first part, we presented a detailed literature review on intelligent as well as different types of control structures. This section was followed by a detailed phenomenon of soil-structure interaction and the different methods of calculation described.

For this, a program was developed in MATLAB for analysis of smart structures post-type beam taking into account the soil-structure interaction.

The numerical study subsequently allowed us to understand the effect of the ISS and the role and importance of structural control.

Key words : control, smart, interaction, soil-structure.

ملخص

في هذه الدراسة، تطرقنا إلى مجالين مختلفين في الهندسة المدنية، مجال الهياكل الذكية والتفاعل بين التربة و الهيكل في الجزء الأول، قدمنا مراجعة مفصلة عن الهياكل الذكية، فضلا عن أنواع مختلفة من هياكل المراقبة. و أعقبنا هذا القسم بشرح مفصل عن ظاهرة التفاعل بين التربة و الهيكل وأساليب مختلفة لحسابها و وصفها

لهذا، تم تطوير برنامج في ماتلاب لتحليل الهياكل الذكية مع مراعاة التفاعل بين التربة و الهيكل.

سمحت هذه الدراسة العديدة في وقت لاحق لنا أن نفهم تأثير التفاعل بين التربة و الهيكل ودور وأهمية الرقابة الهيكلية

الكلمات الدالة : التحكم الذكي، التفاعل، التربة و البنية