

Projet AM25:

Analyse dynamique de la tour Taipei 101

Partie II : Modèle éléments finis



Adama THIAM
Mounia BELLAHCEN
Clément BALCON

Référent: Mr ARNOULT Etienne

Table des matières:

Introduction.....	2
I- Modèle éléments finis.....	2
II- Détermination de la base modale.....	3
1- Modes propres de vibration de la tour.....	3
2- Dimensionnement et intégration de l'absorbeur.....	4
III - Calcul de réponse.....	5
1- Réponse de la tour au vent en régime transitoire.....	5
Définition et Modélisation temporelle de la charge.....	5
Analyse visuelle des résultats.....	6
2- Réponse de la tour en régime permanent.....	7
Objectif et Modélisation de la charge.....	7
Discrétisation spatiale du vent.....	7
Analyse fréquentielle et Résultats.....	7
Conclusion partielle.....	9
3- Réponse de la tour à un tremblement de terre en régime transitoire.....	9
Conclusion:.....	10

Introduction

Ce rapport présente l'étude dynamique par éléments finis de la tour Taipei 101 sous Abaqus. Faisant suite à une approche analytique, ce modèle numérique vise à évaluer avec précision le comportement de la structure face aux sollicitations environnementales majeures : le vent et les séismes. L'enjeu principal réside dans la validation du dispositif d'amortissement passif de 660 tonnes (TMD) situé au sommet. L'analyse s'articule autour de trois axes : la caractérisation modale de la tour, sa réponse temporelle à une rafale de vent de 1 MN, et sa robustesse fréquentielle. Cette étude permet de confronter les exigences de confort des occupants aux limites de résistance structurelle de l'édifice.

I- Modèle éléments finis

Nous utilisons un modèle filaire 1D (Wire) sur Abaqus pour modéliser la tour dont la géométrie s'arrête au toit (c-à-d à 449.4m du sol). L'antenne n'est pas modélisée comme une poutre mais comme une masse ponctuelle posée au sommet pour éviter d'éventuels problèmes liés à la rigidité (l'antenne étant moins rigide que la tour). Le corps de la tour a été ensuite divisé en 5 zones de sections homogènes:

- **Zone 1** : Étages 1 à 26 (soit de 0 à 122.4 m): base évasée : présence de l'intégralité des colonnes (C1, C2, C3, C4) avec une géométrie variable et des appuis extérieurs pour stabiliser l'assise.
- **Zone 2** : Étages 27 à 50 (de 122.4 à 223.2 m): arrêt des colonnes secondaires (C2) et d'angle (C3) à l'étage 26.
- **Zone 3** : Étages 51 à 62 (de 223.2 à 273.6 m): derniers niveaux comportant du béton ; arrêt du remplissage des fûts à l'étage 62 pour alléger la structure en hauteur.

- **Zone 4** : Étages 63 à 90 (de 273.6 à 391.2 m): passage à une structure exclusivement métallique (C1 et C4 uniquement) avec réduction progressive des sections d'acier.
- **Zone 5** : Étages 91 à 101 (de 391.2 à 449.4 m): arrêt des super colonnes (C1) à l'étage 90 ; seul le noyau central (C4) est prolongé jusqu'au sommet pour supporter l'antenne.

Pour prendre en compte le TMD, nous avons procédé de façon similaire en introduisant un point de référence auquel nous avons assigné une masse ponctuelle de 660 tonnes à la hauteur du 88ème étage. Puis, nous l'avons lié à la tour grâce à un système ressort-amortisseur après avoir déterminé les valeurs de raideur et d'amortissement à fournir au logiciel (cf. [Dimensionnement et intégration de l'absorbeur](#)).

II- Détermination de la base modale

1- Modes propres de vibration de la tour

L'objectif dans un premier temps est d'identifier les premiers modes de vibration de la tour pour comprendre comment elle réagit dynamiquement et quels modes risquent d'être excités lors de son utilisation. Pour ce faire, une analyse modale avec le solveur Abaqus/Standard a été réalisée. Le modèle intègre une distribution de masse linéique par zones, avec une condition d'encastrement à la base pour simuler un comportement de type porte-à-faux.

L'analyse consiste à résoudre le problème aux valeurs propres du système (sans amortissement), où les matrices de masse et de rigidité déterminent les fréquences propres et les déformées. Abaqus nous donne directement les valeurs propres et les fréquences dont nous retenons les 5 premières:

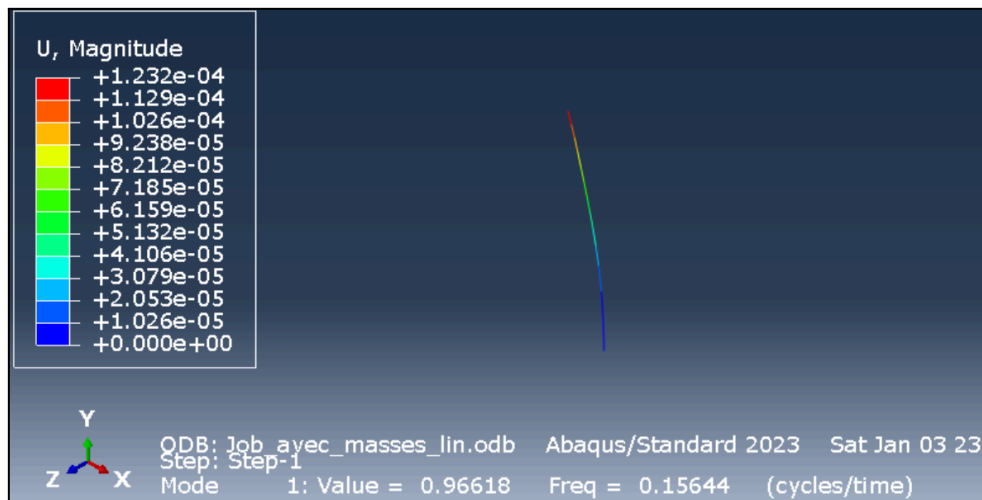
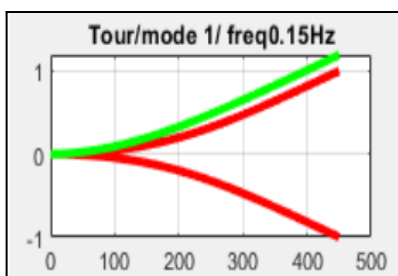


Figure 1. Déformée de la tour sur Abaqus sous l'effet du mode 1

1	Mode	1: Value = 0.96618	Freq = 0.15644	(cycles/time)
2	Mode	2: Value = 0.96618	Freq = 0.15644	(cycles/time)
3	Mode	3: Value = 18.951	Freq = 0.69284	(cycles/time)
4	Mode	4: Value = 18.951	Freq = 0.69284	(cycles/time)
5	Mode	5: Value = 29.081	Freq = 0.85827	(cycles/time)

Figure 2. Valeurs propres et fréquences des 5 premiers modes sur Abaqus



Les résultats montrent que les deux premiers modes sont égaux et ont la même valeur propre (environ 0,97), soit une fréquence de 0,156 Hz. Ce sont des modes dits "dégénérés" : ils correspondent à la flexion fondamentale de la tour selon deux directions perpendiculaires. Sur les déformées, on voit bien que le déplacement est nul à la base et maximum au sommet, ce qui confirme

le comportement en porte-à-faux. Le même comportement était observé en première partie où le mode 1 était à la même fréquence:

Figure 3. Déformée modale obtenue en première partie sur Matlab

Les modes 3 et 4 arrivent à une fréquence de 0,693 Hz. Là aussi, ils sont dégénérés et correspondent à de la flexion d'ordre supérieur, avec un point d'inflexion visible sur la hauteur de la tour. Enfin, le 5ème mode (0,858 Hz) est plus localisé et devrait moins influencer la réponse globale de la tour.

En résumé, le comportement de la tour est dominé par le premier mode de flexion. Comme sa fréquence est basse, c'est lui qui risque le plus d'être excité par le vent ou des séismes. C'est donc sur ce mode qu'il faudra se concentrer pour installer l'oscillateur à masse accordée.

2- Dimensionnement et intégration de l'absorbeur

L'intégration de l'absorbeur dynamique dans le modèle Abaqus s'est faite à environ 380 m du sol (88ème étage), conformément au sujet, et en orientant le système masse-ressort selon la direction du premier mode. Une nouvelle analyse modale du système couplé a ensuite été lancée.

Le TMD a été dimensionné à partir des caractéristiques du premier mode propre de fréquence 0,156 Hz. L'objectif est d'accorder la fréquence de l'absorbeur sur celle de la tour. Il fallait fournir au logiciel les

valeurs de raideur k et d'amortissement c liant le TMD à la tour que l'on a calculées comme suit:

$\omega = 2\pi f$, avec f la fréquence cible valant 0.15 Hz. On trouve $\omega \simeq 0.9425 \text{ rad/s}$ et

$k = m\omega^2$ i. e. $k \simeq 586\,255 \text{ N/m}$

L'amortissement vaut: $c = 2\xi m\omega = 2 * 0.06 * 660000 * 0.9425 \simeq 74\,644 \text{ N.s/m}$.

On choisit un amortissement de 6% car l'absorbeur doit être plus amorti que la structure qu'il protège pour être capable de dissiper l'énergie efficacement sans entrer lui-même dans une résonance excessive.

1	Mode	1: Value = 0.83859	Freq = 0.14575	(cycles/time)
2	Mode	2: Value = 0.91604	Freq = 0.15233	(cycles/time)
3	Mode	3: Value = 0.97723	Freq = 0.15733	(cycles/time)
4	Mode	4: Value = 17.992	Freq = 0.67509	(cycles/time)
5	Mode	5: Value = 17.994	Freq = 0.67513	(cycles/time)

Figure 5. Valeurs propres et fréquences des 5 premiers modes sur Abaqus (tour+TMD)

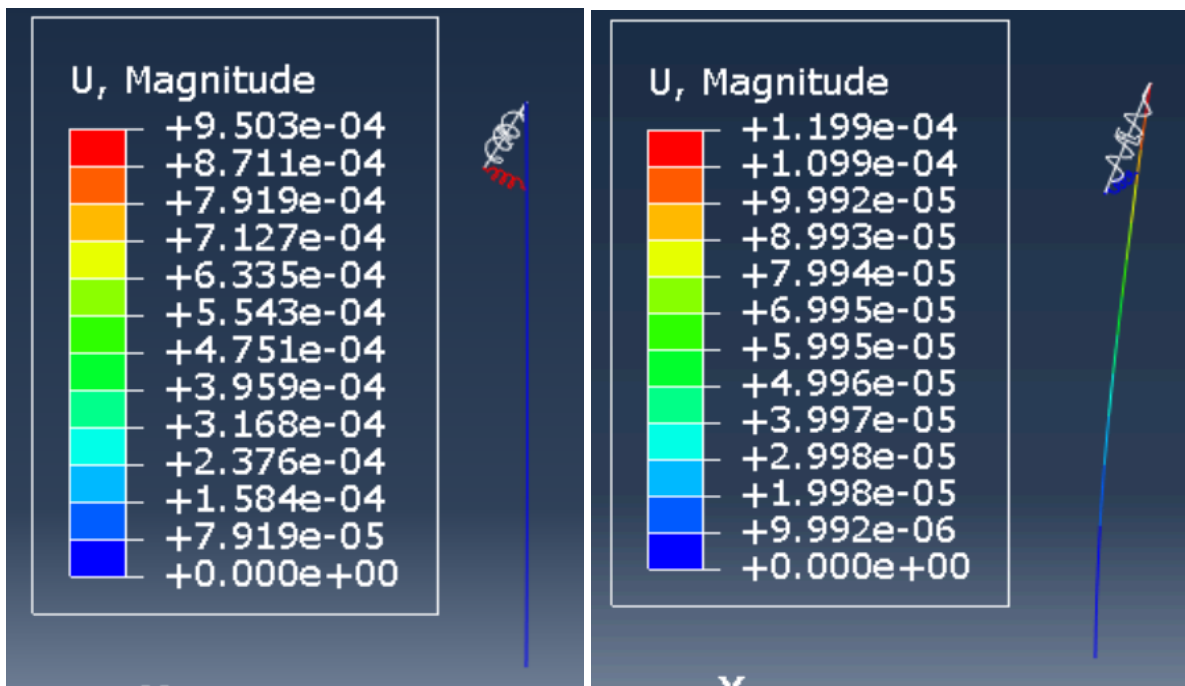


Figure 6. Déformée de la tour avec TMD sous l'effet des mode 1 et 2

Les résultats montrent que le premier mode initial de la tour seule disparaît. Il est remplacé par plusieurs modes de basse fréquence, répartis entre 0,146 et 0,157 Hz. Ce phénomène de dédoublement fréquentiel (ou de scission) est caractéristique d'un absorbeur bien accordé et valide le dimensionnement choisi.

Par ailleurs, les modes de flexion d'ordre supérieur (autour de 0.675 Hz) restent quasiment inchangés. Cela confirme que l'absorbeur agit de manière sélective sur le premier mode sans modifier le reste du comportement dynamique de la structure. Dans la première partie, nous avons expliqué que cette scission introduit un mode correspondant à un mouvement en opposition de phase entre la tour et le TMD, puis que les modes suivants (qui étaient également à 0.67 Hz), se rapprochaient des modes 3 et 4 de la tour sans absorbeur.

III - Calcul de réponse

1- Réponse de la tour au vent en régime transitoire

Définition et Modélisation temporelle de la charge

Dans cette section, nous étudions la réponse de la tour soumise à une rafale de vent ponctuelle. Contrairement à l'analyse harmonique de la partie suivante, il s'agit ici d'une analyse temporelle (*Transient modal dynamics*) soumise à une charge impulsionnelle.

La distribution spatiale de la charge (répartition par zones sur la hauteur) reste identique à celle définie en 2.3.2. Cependant, l'évolution temporelle $f(t)$ est ici modélisée par une fonction "porte" (créneau) correspondant à une rafale d'une durée $\Delta = 3s$, telle que définie dans le sujet (§ 5.1)

$$f(t) = 1 \text{ si } 0s \leq t \leq 3s$$

$$f(t) = 0 \text{ si } t \geq 3s$$

Analyse visuelle des résultats

Nous avons simulé le déplacement du sommet de la tour en fonction du temps pour deux cas : sans absorbeur (TMD) et avec absorbeur.

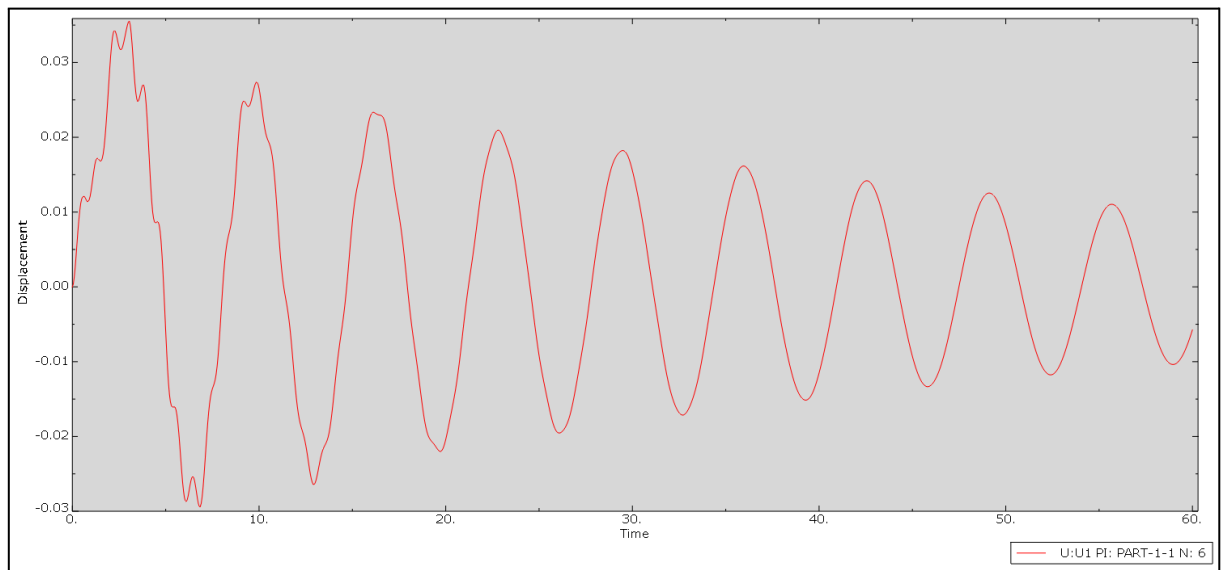


Figure 8: Évolution temporelle du déplacement horizontal U1 au sommet sans TMD

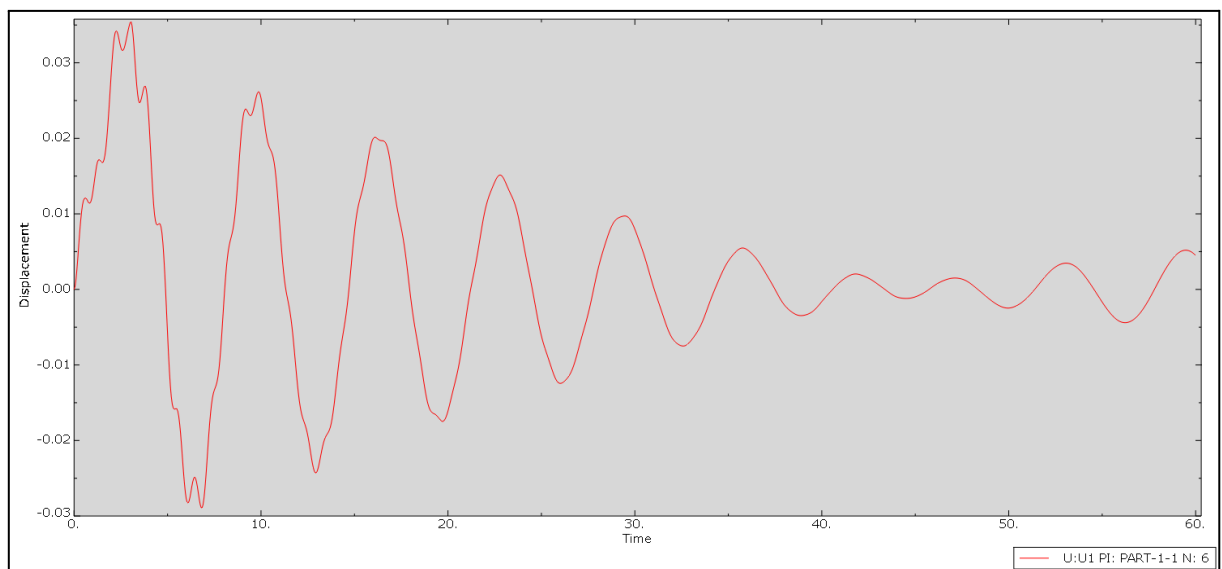


Figure 9: Évolution temporelle du déplacement horizontal U1 au sommet avec TMD

L'analyse des courbes de déplacement au sommet en fonction du temps permet de distinguer deux phases distinctes. Durant la phase de mise en charge, le comportement est strictement identique pour les deux configurations. La tour se déforme progressivement sous l'effet de la poussée du vent jusqu'à atteindre un déplacement maximal d'environ 0,035 m (soit 3,5 cm). Ce pic d'amplitude survient aux alentours de $t = 3,5$ secondes, c'est-à-dire immédiatement après l'arrêt de la rafale. On constate ainsi que la présence du TMD ne permet pas de réduire le déplacement maximal lors de ce premier cycle de chargement impulsif, l'absorbeur n'ayant pas le temps de s'activer efficacement sur une durée aussi courte.

Les différences de comportement dynamique n'apparaissent que durant la seconde phase, correspondant aux oscillations libres après l'arrêt du vent ($t > 3$). Dans la configuration sans absorbeur, la tour oscille librement avec une décroissance régulière et monotone de l'amplitude, pilotée par l'amortissement structural. À l'inverse, la réponse avec le TMD présente une modulation de l'enveloppe de décroissance,

visible par des variations d'amplitude successives ("battements"). Ce phénomène traduit l'échange d'énergie vibratoire entre la tour et l'absorbeur, modifiant la dissipation d'énergie au cours du temps.

2- Réponse de la tour en régime permanent

Objectif et Modélisation de la charge

L'objectif de cette section est de déterminer la réponse dynamique de la tour en régime permanent lorsqu'elle est soumise à une excitation de type harmonique représentant l'action du vent. Contrairement à l'analyse transitoire menée précédemment, l'étude ne vise plus à suivre l'évolution temporelle de la réponse, mais à analyser comment la tour réagit en fonction de la fréquence d'excitation, afin d'identifier les fréquences auxquelles la structure est la plus sensible et les phénomènes de résonance associés.

La charge dynamique appliquée correspond à la force du vent définie dans la section 5.1 du sujet, modulée par une fonction harmonique:

$$F(z, t) = q(z) * \sin(\omega t)$$

avec l'amplitude de la charge linéique $q(z)$ donnée par:

$$q(z) = \rho_{air} * B(z) * (V(z))^2$$

Discrétisation spatiale du vent

Afin d'intégrer cette charge variant continûment avec l'altitude z dans le modèle éléments finis, nous avons procédé à une discrétisation par zones. La tour a été divisée en 5 zones de hauteur. Pour chaque zone, une vitesse moyenne $V(z_{moy})$ et une largeur moyenne $B(z_{moy})$ ont été calculées afin d'obtenir une charge linéique uniforme par morceaux.

Les valeurs calculées et injectées dans le modèle (Abaqus) sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Zone	Étages	Hauteur (m)	Zmoy (m)	Largeur $B(z_{moy})$	Vitesse $V(z_{moy})$ (m/s)	Charge q_{moy} (N/m)
1	1-26	0 à 122.4	61.2	67.5	77.7	489125
2	27-50	122.4 à 223.2	172.8	60.5	90.2	590858
3	51-62	223.2 à 273.6	248.4	60.5	94.9	654040
4	63-90	273.6 à 391.2	332.4	60.5	99.0	711774
5	91-101	391.2 à 449.4	420.3	30.0	102.4	377579

Analyse fréquentielle et Résultats

Une analyse harmonique par balayage en fréquence a été réalisée sur la plage de 0 à 25 Hz avec un amortissement modal constant de 2%. Nous avons comparé la réponse en déplacement au sommet de la tour pour deux configurations distinctes : la structure seule et la structure équipée de l'absorbeur dynamique (TMD).

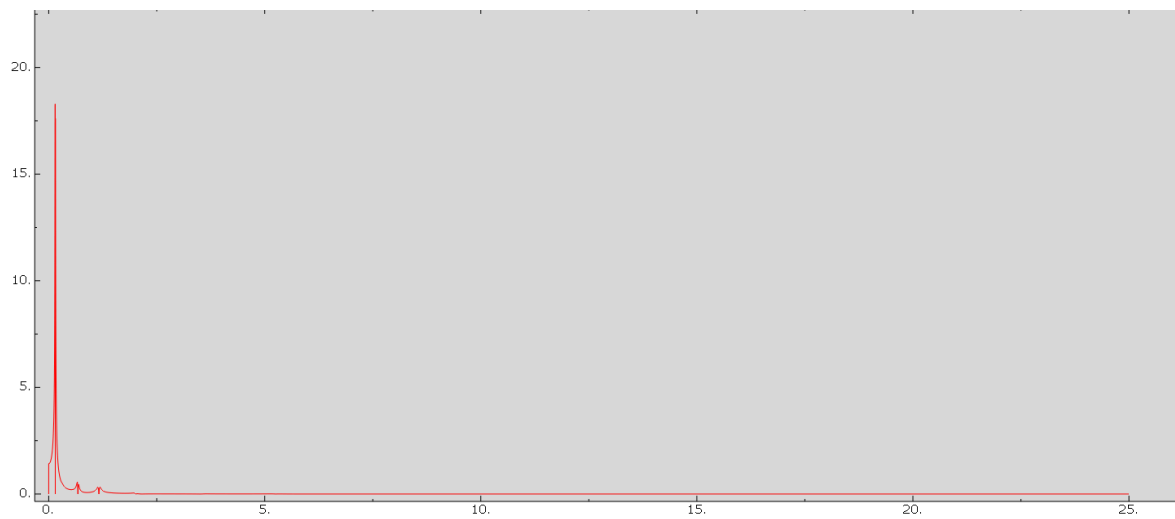


Figure 10. Évolution temporelle du déplacement horizontal U1 au sommet sans TMD

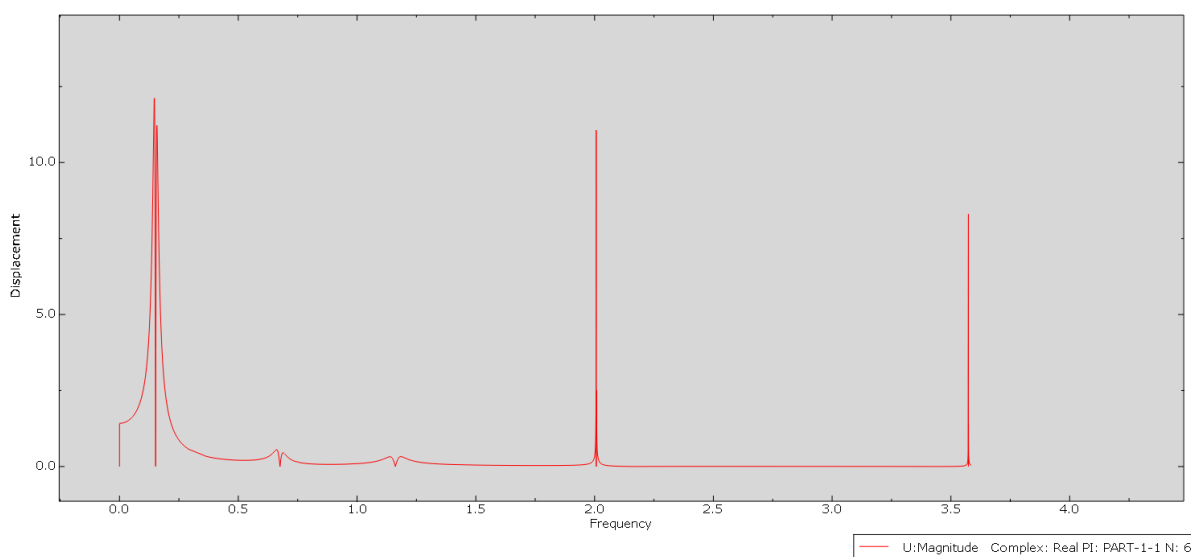


Figure 11. Évolution temporelle du déplacement horizontal U1 au sommet avec TMD

Concernant la configuration sans TMD, la réponse fréquentielle (visible sur la Figure 11) met en évidence un pic de résonance unique et très marqué à la fréquence fondamentale de la tour. Ce pic correspond à un déplacement maximal d'environ 20 mètres. Une telle amplitude confirme la nécessité d'un système d'amortissement pour assurer l'intégrité de la structure.

L'ajout de l'absorbeur passif (avec TMD) modifie considérablement la réponse (voir Figure 12). On observe d'une part le phénomène recherché de dédoublement du pic de résonance, limitant le déplacement maximal à environ 12 mètres sur les deux nouveaux modes couplés (réduction de 30%).

D'autre part, on note l'apparition de pics parasites nets aux alentours de 2 Hz et 3,5 Hz. Ces réponses ponctuelles, absentes du cas sans TMD, ont été identifiées comme résultant d'une erreur de modélisation numérique (artefacts) lors de l'intégration du TMD et ne reflètent pas un comportement physique réel de la tour.

Conclusion partielle

Malgré les artefacts numériques observés à haute fréquence, l'utilisation du TMD permet de réduire l'amplitude maximale de la réponse en régime permanent de manière significative autour de la fréquence fondamentale. Ces résultats valident le dimensionnement de l'absorbeur effectué en partie 2.2.2.

3- Réponse de la tour à un tremblement de terre en régime transitoire

Cette dernière étude vise à évaluer le comportement de la tour soumise à un séisme. Contrairement aux sollicitations de vent précédentes appliquées sous forme de forces réparties sur la hauteur, le chargement est ici introduit par une accélération imposée au pied de la tour suivant la direction X. La réponse temporelle a été calculée pour les deux configurations afin de déterminer l'efficacité du TMD sur ce type de sollicitation.

L'analyse des courbes de réponse, reportées sur les figures 12 et 13 ci-dessous, permet de distinguer une phase d'excitation intense durant les 50 premières secondes, suivie d'une phase d'oscillations libres. Dans la configuration sans dispositif de contrôle, le déplacement maximal enregistré lors de la phase forte est de l'ordre de 0,65 m. On observe ensuite une décroissance lente des oscillations résiduelles, témoignant du faible amortissement structurel de la tour seule.

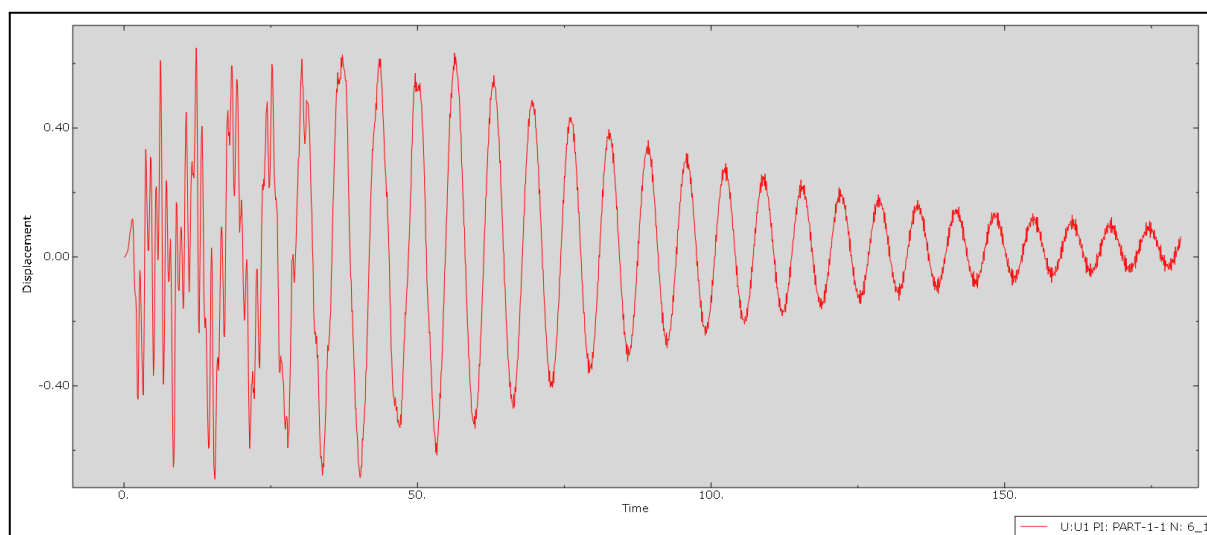


Figure 12. Courbe de réponse au tremblement de terre sans TMD

La comparaison avec la configuration équipée du TMD révèle un comportement nuancé. Concernant la sécurité structurelle (déplacement maximal), l'ajout de l'absorbeur n'influence pas de manière significative la réponse : le pic reste quasi-identique (environ 0,65 m) durant le séisme. En revanche, l'efficacité du dispositif est clairement visible sur la phase de relaxation après le choc principal ($t > 100s$). Comme on peut le voir sur la courbe ci-dessous, l'amplitude des oscillations décroît nettement plus rapidement que dans le cas sans absorbeur.

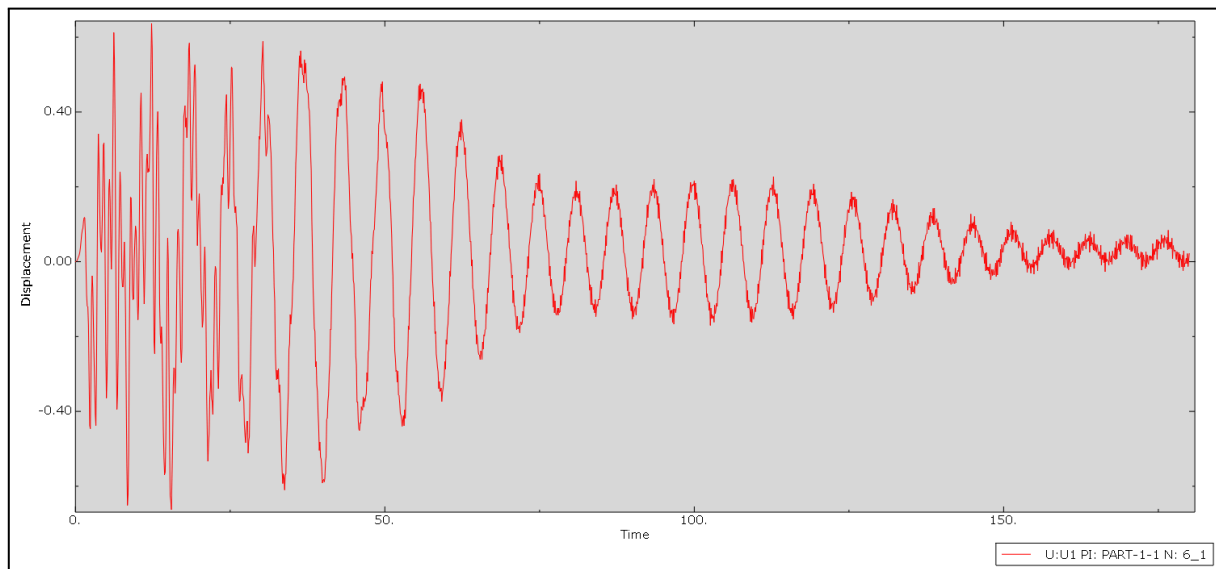


Figure 13. Courbe de réponse au tremblement de terre avec TMD

Ce résultat s'explique par la dynamique du TMD. S'il n'a pas le temps de s'activer suffisamment vite pour contrer les pics aléatoires et brutaux du début du séisme, il joue parfaitement son rôle de dissipateur d'énergie sur la durée. En conclusion, bien que le TMD ne permette pas de réduire le déplacement maximal sous séisme (dimensionnant pour la résistance ultime), il améliore considérablement l'amortissement global de la structure, ce qui permet de stabiliser la tour plus vite après l'événement et de réduire la fatigue des matériaux.

Conclusion:

Cette étude numérique démontre que si la tour possède une raideur structurelle importante, son faible amortissement naturel (2%) la rend vulnérable aux phénomènes de résonance. L'intégration du TMD (Tuned Mass Damper) s'avère être un organe de sécurité et de confort indispensable. L'analyse fréquentielle (2.3.2) a révélé que le TMD divise le pic de résonance principal en deux amplitudes nettement plus faibles, prouvant que l'énergie est efficacement transférée de la structure vers l'absorbeur de 660 tonnes. Cette dissipation d'énergie limite les accélérations au sommet, garantissant la viabilité de l'ouvrage face aux rafales de vent extrêmes. En régime transitoire, bien que l'impact du TMD soit plus limité sur le déplacement maximal lors du choc initial, il permet une extinction des oscillations libres beaucoup plus rapide. En conclusion, le TMD agit comme un régulateur dynamique essentiel, protégeant Taipei 101 contre les dommages structurels cumulatifs et stabilisant la tour en quelques cycles seulement après une sollicitation majeure.