

Etude Non Linéaire des Comportements Dynamiques des Structures Métalliques en Grande Déformation

M.Amine Abid^a, A.El Ghoulbzouri^a, Lmokhtar Ikharrazne^a.

a. Ecole Nationale Des Sciences Appliquées Al-Hoceima

Equipe de recherche : Optimisation et Dynamique des Structures en Génie Civil (MODSGC)

e.abdelouafi@hotmail.fr , med.amin0124@gmail.com

Résumé :

Les structures métalliques sont soumises aux différentes sollicitations sismiques et dynamiques, ce qui consiste à faire recours à des systèmes de renforcement à savoir : le choix des profilés, boulonnage-rigidification des nœuds ou fibre de carbone.

Ce projet représente une étude, à l'aide d'un logiciel de calcul en éléments finis SAP2000, d'une structure métallique soumise aux forces dynamiques (suivant le sens x et qui varient en fonction du temps).

*La force dynamique s'écrit sous cette forme : $F_i(t) = F_0 * \sin(\omega_i t)$*

Avec : ω = pulsation (rad/sec) et F_0 = amplitude en (kN)

Après avoir défini et identifié les différents éléments (profilés IPE et HEB) et paramètres (matériaux, chargements...) dans le domaine non-linéaire (plastique) pour atteindre les déplacements maximaux et les déformations maximales, nous allons renforcer notre structure par des barres de contreventement vertical sous trois formes, en vue de démontrer le plus optimal :

- Contreventement à droite,
- Contreventement à gauche,
- Contreventement en X.

Après une étude comparative des résultats obtenus à partir du logiciel (déplacement-moment fléchissant –effort tranchant), il est évident de conclure le type de contreventement le plus optimal qui sert à minimiser, le maximum possible, les déplacements X_m dans la structure (suivant le sens x), les sollicitations et les déformations des éléments structuraux ou de la construction et à améliorer sa stabilité.

Abstract :

Metallic structures are subjected to different seismic and dynamic solicitations, which involves the use of reinforcement systems as: the choice of the profiling, bolting-stiffening of the nodes or carbon fiber. This paper represents a study, using a finite element calculation software SAP2000, of a metallic structure subjected to dynamic forces (following the x direction and which vary with time).

The dynamic force is written in this form: $F_i(t) = F_0 \sin(\omega_i t)$

With: ω = pulsation and F_0 = amplitude in (kN)

After defining and identifying the different elements (IPE and HEB profiles) and parameters (materials, loads ...) in the non-linear domain (plastic) to reach the maximum displacements and maximum deformations, we will strengthen our structure by vertical bracing bars in three forms, in order to demonstrate the most optimal:

- *Bracing to the right,*
- *Bracing to the left,*
- *Bracing in X.*

After a comparative study of the results obtained from the software (displacement-moment bending -shear), it is obvious to conclude the most optimal type of bracing that serves to minimize the maximum possible displacements, solicitations and deformations of structural elements or in the structure (following the x direction) and to improve its stability.

Mots clefs : Construction métallique, plasticité, non linéarité, déplacements, contreventement.

1. Introduction :

Les phénomènes et les déformations, illustrés dans une structure métallique soumise aux sollicitations violentes notamment les sollicitations dynamiques, ont une importance considérable puisqu'ils permettent d'aboutir à une idée globale sur le comportement dynamique non linéaire de ces constructions dans le domaine élasto-viscoplastique, et de déduire approximativement les problèmes de la durée de vie, d'estimation de la sécurité et de la stabilité de la structure.

Effectivement, il existe plusieurs logiciels de calcul en éléments finis pouvant effectuer des calculs dans le domaine élasto-viscoplastique en traction compression, flexion simple et flexion composée afin de parvenir à des résultats sur le comportement de la structure, les déplacements maximaux, les zones les plus sollicitées, et la capacité de résistance aux sollicitations soumises aux forces dynamiques qui changent en fonction du temps.

Ces résultats obtenus après modélisation et identification des différents éléments et paramètres dans cadre de notre étude (non-linéaire) permettent de rassembler un ensemble d'informations qui nous serviront de base dans le choix du type de renforcement parvenant à réduire le maximum possible les sollicitations, les endommagements et les déplacements et à augmenter la stabilité de la structure. Notre étude s'intéresse particulièrement à l'adoption d'une technique de renforcement qui vise à réduire les sollicitations, les déformations et les déplacements maximaux (X_m) et à améliorer la stabilité de la structure soumise à des forces équivalentes au vent et qui sont considérées comme des forces dynamiques variables en fonction du temps.

2. Dispositif méthodologique :

La réalisation d'un projet sur les logiciels en éléments finis nécessite tout d'abord l'identification des différents paramètres et éléments ainsi que le choix du type d'analyse. Notre méthodologie adoptée suit la même logique dans l'objectif d'atteindre des résultats corrects, logiques et raisonnables. La figure (1) ci-dessous met en relief la démarche suivie dans la réalisation d'un projet sur une construction métallique dans le domaine non-linéaire et qui est soumise aux forces dynamiques.

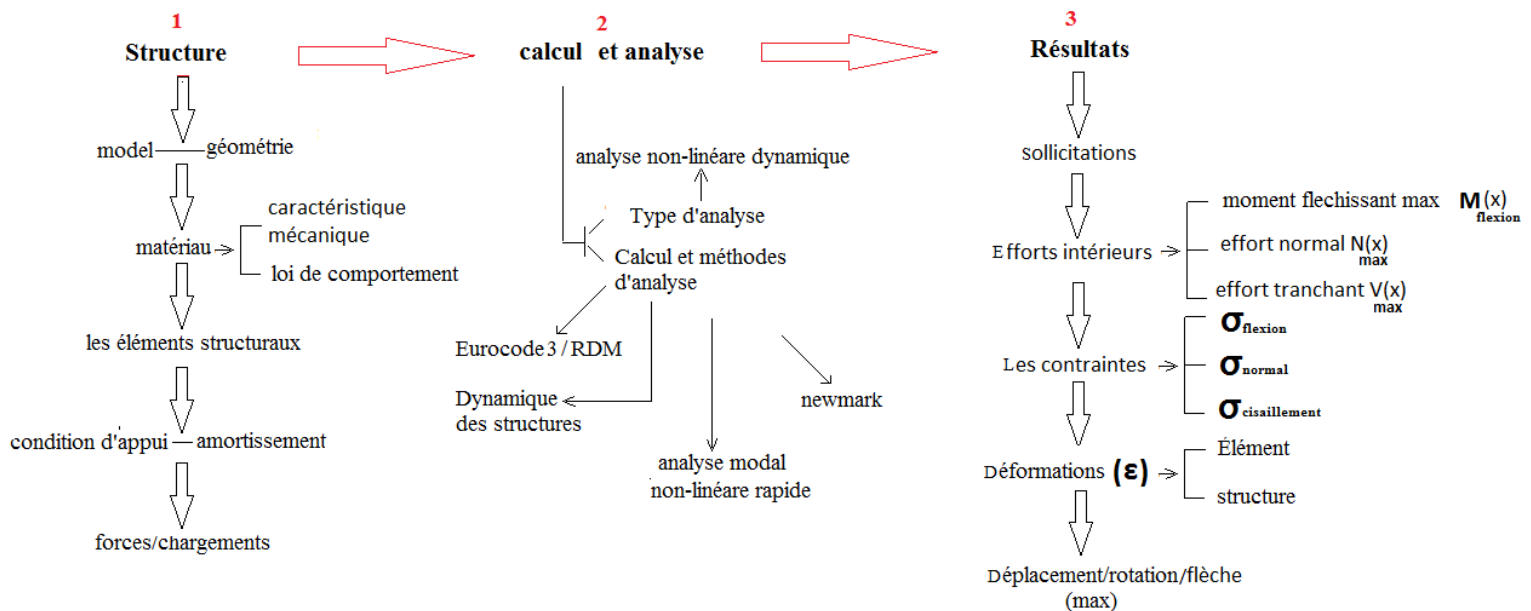


Figure 1 : schéma illustrant les étapes suivies pour la réalisation de notre étude sur SAP2000

Un raisonnement et une démarche spécifiques font l'objet de notre processus de traitement de notre étude. Dans cette partie, nous allons définir et expliquer les différents paramètres et éléments présentés dans la figure (1) et qui reflètent les étapes de notre démarche adoptée pour répondre à notre problématique.

❖ **Structure :**

- Model : 2D - plan (x,z)
- Géométrie : 5 niveaux - 3 travers avec H = 4m et L = 5m
- Matériau : acier S275
 - Nuance = 275 MPA
 - Coefficient de poisson = 0,3
 - $E_{\text{young}} = 210000000$ MPA
 - $G = 80769231$ MPA

Loi de comportement :

Pour le cas d'une structure métallique soumise aux forces du vent (équivalentes à un chargement dynamique cyclique) [1], certaines fibres de la structure peuvent être sollicitées régulièrement et successivement en traction et en compression.

Cette loi simplifiée est représentée dans la Figure 2.

Il est à noter qu'on atteint la ruine tandis que la somme du déplacement plastique en traction et en compression est supérieure à la limite ultime :

$$\sigma = 0 \quad \text{si} \quad |\varepsilon_{pl}^+| + |\varepsilon_{pl}^-| > \varepsilon_u$$

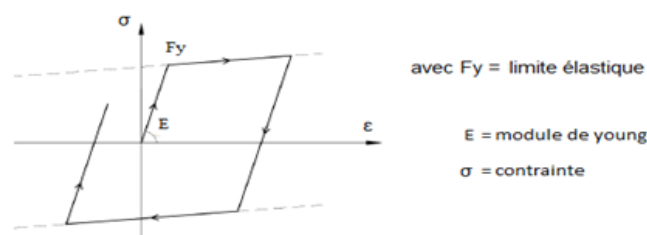


Figure 2 : Loi de comportement de l'acier utilisée

- Les éléments structuraux :
Les poteaux et les poutres : Les profilés HEB et IPE de la classe I peuvent atteindre leur résistance plastique.
- Condition d'appui : Nous supposons que la structure est encastree dans le sol et les nœuds sont rigides.
- Amortissement : 5 % pour les constructions métalliques.
- Force : dynamique en fonction du temps (t) (sinusoïdale cyclique suivant le sens X).
- Type de Chargement : réparti non-linéaire.
- Maillage / élément [2] : Les éléments poutres les plus fréquents se caractérisent par une géométrie de référence très simple, soit un segment de droite ayant une longueur unitaire doté d'un nœud à chaque extrémité (figure 3-a) et, dans certains cas, d'un troisième nœud au milieu (figure 3-b). En général, chaque nœud détient six degrés de liberté, équivalant aux six déplacements généralisés de la théorie des poutres (trois translations et trois rotations). Quant à notre étude, et compte tenu que les éléments sont limités à une cinématique plane (2D), ils ne détiennent donc que deux translations et une rotation par nœud.

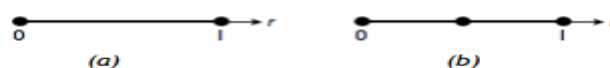


Figure 3 : Géométrie de référence des deux types d'éléments poutres.

❖ **Analyse et calcul :**

- Type d'analyse :
 - *Analyse non – linéaire dynamique :*

Il s'agit d'une analyse sous des forces dynamiques en fonction du temps (t) dans le domaine non-linéaire avec l'identification des différents éléments et chargements dans la zone plastique. Cette analyse nous permet d'atteindre :

- les déplacements Max, rotation, Moment fléchissant Max et les déformations des éléments ou de la structure.

- Calcul et Méthode d'Analyse:
 - **Eurocode3 (Normes pour le calcul des structures métalliques) et résistance des matériaux (RDM).**

L'eurocode3 et La résistance des matériaux servent à dimensionner et vérifier les éléments et leurs résistances et à calculer et déterminer les sollicitations et les efforts intérieurs, en plus des contraintes et déformations des éléments structuraux ou de la construction.

➤ **Dynamique des structures :**

La dynamique des structures nous permet de déterminer les matrices de rigidité , de masse et d'amortissement de la structure à plusieurs degrés de liberté soumise aux excitations harmoniques. De plus, elle sert à formulé correctement les forces dynamiques harmoniques après avoir évalué les valeurs propres (pulsation propre, mode propre, fréquence, période).

➤ **Analyse modale non – linéaire rapide (FNA=Fast Nonlinear Analysis) :**

La résolution des équations non - linéaires suit une logique itérative, c'est-à-dire à chaque pas de temps jusqu'à ce que la solution soit aboutie [3].

L'équation fondamentale du mouvement d'un système PDDL soumis à un chargement dynamique s'écrit sous la forme :

$$M. \ddot{\mathbf{x}} + C. \dot{\mathbf{x}} + K.X + R_{NL} (t) = R(t)$$

Avec M = matrice de masse C =matrice du coefficient d'amortissement
et K = matrice de la rigidité.

R(t) est le vecteur force du chargement dynamique extérieur.

R_{NL}(t) représente le vecteur force nodale globale obtenu de la somme des forces dans les éléments non - linéaires.

Le calcul des pulsations propres ω_i de la structure et des modes propres ϕ_i correspondant à chacune des pulsations ω_i calculées suivant l'analyse modale grâce à l'équation du mouvement avec (C = F(t) = 0) .

$$M.\ddot{\mathbf{x}} + C.\dot{\mathbf{x}} + K.X = F(t) \text{ avec } C = F(t) = 0$$

Alors l'équation devient sous la forme : $M \cdot \ddot{X} + K \cdot X = 0$

- Les pulsations propres ω_i peuvent être déterminées par la résolution de :

$$\text{Det}(K - M\omega^2) = 0$$

- Le mode propre ϕ_i correspondant à une pulsation ω_i est calculé à partir de l'équation suivante :

$$\text{Det}(K - M\omega_i^2) \phi_i = 0$$

L'amortissement utilisé est celui de Rayleigh. Cette méthode considère une combinaison linéaire des matrices de masse et de raideur :

$$C = \alpha M + \beta K$$

La détermination des coefficients α et β se fait de telle manière que la valeur du taux d'amortissement pour deux modes soit fixée.

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \\ \xi_j = \frac{\alpha}{2\omega_j} + \frac{\beta\omega_j}{2} \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i^2 - \omega_j^2} (\omega_i\xi_j - \omega_j\xi_i) \\ \beta = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \left(\frac{\xi_i}{\omega_j} - \frac{\xi_j}{\omega_i} \right) \end{array} \right.$$

Avec ω_i la pulsation propre du mode i et ξ_i , le taux d'amortissement associé à ce mode.

Avec la résolution de cette équation fondamentale du mouvement d'un système à plusieurs degrés de liberté, nous pouvons calculer les déplacements, le vecteur de force,...

➤ Méthode de Newmark :

La méthode de Newmark [1] est considérée comme étant une technique de résolution pas à pas. Elle permet de décomposer le temps en intervalles Δt dans le but de calculer les déplacements, la vitesse, et l'accélération seulement en un nombre limité d'instants. Par ailleurs, la méthode de Newmark sert à résoudre le cas des structures non-linéaires, en se basant sur une approximation des intégrales suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{q}_{t+\Delta t} &= \dot{q}_t + \int_t^{t+\Delta t} \ddot{q}(t) dt \\ q_{t+\Delta t} &= q_t + \int_t^{t+\Delta t} \dot{q}(t) dt \end{aligned}$$

Sous la forme :

$$\begin{aligned} \dot{q}_{t+\Delta t} &= \dot{q}_t + [(1-\delta) \ddot{q}_t + \delta \ddot{q}_{t+\Delta t}] \Delta t \\ q_{t+\Delta t} &= q_t + \dot{q}_t \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{q}_t + \alpha \ddot{q}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^2 \end{aligned}$$

Ce système d'équation est ensuite complété par l'équation du mouvement discrétisée :

$$M \ddot{q}_{t+\Delta t} + C \dot{q}_{t+\Delta t} + K q_{t+\Delta t} = F_{\text{ext.},t+\Delta t}$$

Pratiquement, les différentes équations présentées visent à calculer le déplacement.

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\alpha \Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{\delta}{\alpha \Delta t} \mathbf{C} + \mathbf{K} \right) \mathbf{q}_{t+\Delta t} = \\ = \mathbf{F}_{\text{ext.,}t+\Delta t} + \mathbf{M} \left(\frac{1}{\alpha \Delta t^2} \mathbf{q}_t + \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{\mathbf{q}}_t + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{\mathbf{q}}_t \right) \\ + \mathbf{C} \left(\frac{\delta}{\alpha \Delta t} \mathbf{q}_t + \left(\frac{\delta}{\alpha} - 1 \right) \dot{\mathbf{q}}_t + \Delta t \left(\frac{\delta}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{\mathbf{q}}_t \right) \end{aligned} \quad \text{Eq(1)}$$

Ce qui mène par la suite au calcul de la vitesse et de l'accélération.

$$\dot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t} = \frac{\delta}{\alpha \Delta t} (\mathbf{q}_{t+\Delta t} - \mathbf{q}_t) + \left(1 - \frac{\delta}{\alpha} \right) \dot{\mathbf{q}}_t + \Delta t \left(1 - \frac{\delta}{2\alpha} \right) \ddot{\mathbf{q}}_t \quad \text{Eq(2)}$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\alpha \Delta t^2} (\mathbf{q}_{t+\Delta t} - \mathbf{q}_t) - \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{\mathbf{q}}_t - \Delta t \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{\mathbf{q}}_t \quad \text{Eq(3)}$$

Pourtant, il faut prc

méthode soit de toute manière stable, nous devons vérifier les relations suivantes :

$$\begin{cases} \delta \geq 0.5 \\ \alpha \geq 0.25(0.5 + \delta)^2 \end{cases}$$

En admettant que la valeur des paramètres $\alpha=0,25$ et $\gamma=0,5$, ces critères sont vérifiés.

Ce choix spécifique de paramètres constitue la méthode de l'accélération constante la plus fréquemment utilisée.

Afin de calculer le déplacement et la vitesse au temps $t+\Delta t$, il faut se baser sur les valeurs du déplacement et de la vitesse obtenues au temps t dans l'équation (1). Ensuite, le résultat doit être intégré dans les équations (2) et (3) pour atteindre la vitesse et l'accélération au temps $t+\Delta t$.

Cependant, notons qu'au premier pas de temps (étant donné qu'il n'existe aucun pas précédent et donc aucune donnée enregistrée), un déplacement, une vitesse et une accélération initiales doivent être utilisés.

- Conditions initiales

Les conditions initiales dépendent du type de la structure et comment elle a été considérée (chargée ou non).

Pour notre étude, nous nous intéressons sur les conditions initiales où le poids propre et le chargement initial sont tenus en compte, parce qu'ils consistent tout d'abord à calculer les déplacements de la structure sous charge initiale et ce, à l'aide d'un calcul statique. Ces déplacements serviront de conditions initiales lors du calcul dynamique.

Les conditions initiales sont alors les suivantes :

$$\mathbf{q} \neq 0$$

$$\dot{\mathbf{q}} = 0$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = 0$$

3. Présentation du projet et résultats :

3.1 Présentation du projet :

- Les résultats qui seront présentés ultérieurement sont des valeurs de déplacements maximaux X_m notés à un instant (t) pour un nœud de sommet du bâtiment soumis aux forces dynamiques $F_i(t)$ et étudiés selon quatre cas différents :

1^{er} cas : La structure n'est pas renforcée

2^{ème} cas : La structure est renforcée par contreventement à droite

3^{ème} cas : La structure est renforcée par contreventement à gauche

4^{ème} cas : La structure est renforcée par contreventement en X

- Nous allons également présenter l'influence du contreventement sur la minimisation des sollicitations et des déformations dans un élément (poutre) de la structure métallique étudiée .

Afin de faciliter l'identification des paramètres de notre modèle, nous en faisons, en ce qui suit, une présentation :

- Présentation des éléments constitutifs et de la géométrie de la structure [4] [5] :

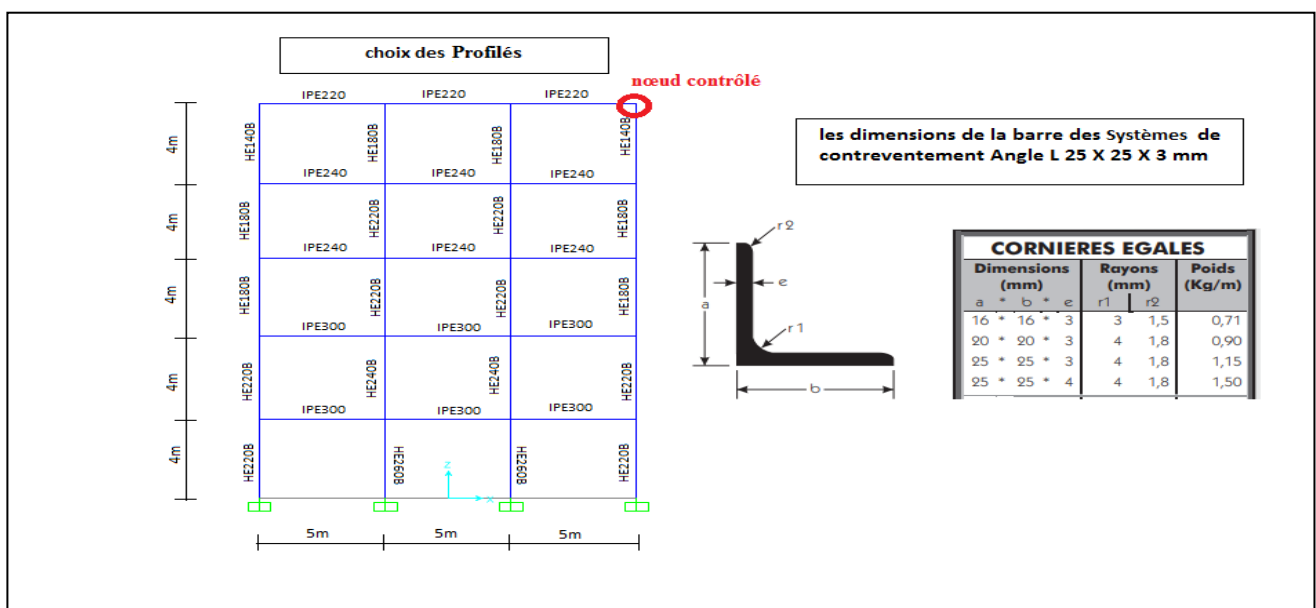


Figure4 : Les éléments constitutifs et la géométrie de la structure

- Présentation de la classe et de la résistance des profilés selon l'eurocode 3[6] :

Profilés	Classe en flexion	Classe en compression	Nuance MPa	Résistance
Tous les HEB	1	1	275	Sections pouvant atteindre leur Résistance plastique
IPE 220	1	1		
IPE 240 et IPE 300	1	2		

Tableau1 : La classe et la résistance des profilés selon l'eurocode3

- Présentation du chargement :



Type du Chargement	Cas de Chargement	Valeur (kn/m)	Niveau	Description
Répartie	Non-linéaire	35	5	
		45	1, 2, 3 et 4	

Tableau2 : Le chargement appliqué à la structure

- Présentation des forces dynamiques $F_i(t)$:

Le tableau 3 suivant résume les forces dynamiques appliquées sur notre structure ainsi que leurs spécificités [7] :

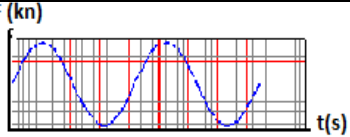
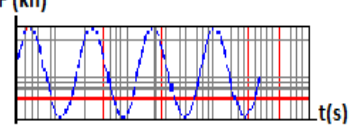
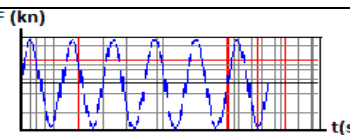
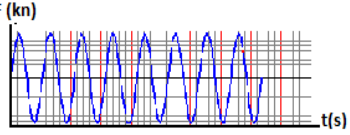
Diagraphe de la force dynamique	Période T (sec)	Pulsation ω (rad/sec)	Amplitude (KN)	Formule de la force	Symbole de la force	Le sens de la force
	12,56	0,5	15	$15 \cdot \sin(\omega_1 t)$	$F_1(t)$	X
	6,28	1	15	$15 \cdot \sin(\omega_2 t)$	$F_2(t)$	X
	4,18	1,5	15	$15 \cdot \sin(\omega_3 t)$	$F_3(t)$	X
	3,14	2	15	$15 \cdot \sin(\omega_4 t)$	$F_4(t)$	X

Tableau3 : Les forces dynamiques $F_i(t)$

En effet, le calcul des déplacements maximaux X_m et des sollicitations a été réalisé à l'aide du logiciel SAP2000 [4] [5] [8] pour chacune des forces $F_1(t)$, $F_2(t)$, $F_3(t)$ et $F_4(t)$, sur les quatre types de structures illustrées dans la figure 5 suivante ayant des chargements et géométries identiques et des systèmes de contreventement différents :

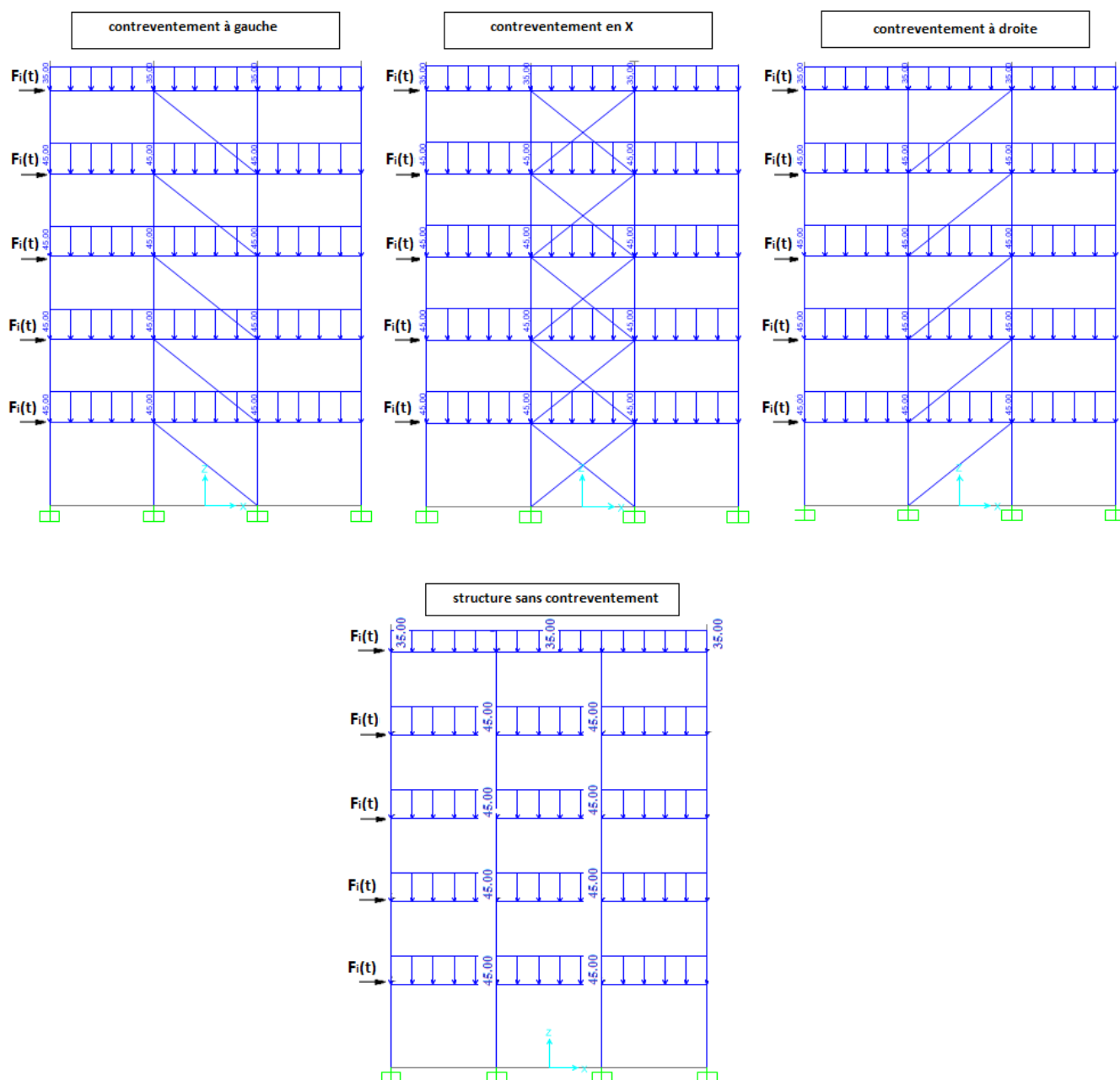


Figure 5: Les quatre types de structures étudiés

3.2 Résultats et discussion :

Après avoir défini l'ensemble des paramètres (géométries, profilés, chargements ainsi que les forces dynamiques) dans le domaine d'étude (non-linéaire) sur le logiciel SAP2000, nous allons, donc, essayer dans l'étape qui suit de présenter dans le tableau4 ci-après les valeurs des déplacements maximaux X_m pour le nœud contrôlé (de sommet) concernant chacun des cas pré-illustrés.

Ensuite, nous allons présenter dans le tableau5 les valeurs des sollicitations (effort-interne) dues aux forces dynamiques (le cas où $F_1(t) = F_3(t)$) dans une poutre métallique, suivant deux cas :

- 1- la structure est renforcée par un contreventement en X.
- 2- la structure est non-renforcée.

		$F_i(t) = 15 * \sin(\omega_i t)$			
		$\omega_1=0,5$	$\omega_2=1$	$\omega_3=1,5$	$\omega_4=2$
Type de contreventement	sans contreventement	$X_{\max} = 0,0543 \text{ m}$	$X_{\max} = 0,0564 \text{ m}$	$X_{\max} = 0,0567 \text{ m}$	$X_{\max} = 0,0560 \text{ m}$
	contreventement à droite	$X_{\max} = 0,0312 \text{ m}$	$X_{\max} = 0,0321 \text{ m}$	$X_{\max} = 0,0321 \text{ m}$	$X_{\max} = 0,0327 \text{ m}$
	contreventement à gauche	$X_{\max} = 0,0311 \text{ m}$	$X_{\max} = 0,0319 \text{ m}$	$X_{\max} = 0,0319 \text{ m}$	$X_{\max} = 0,0326 \text{ m}$
	contreventement en X	$X_{\max} = 0,0226 \text{ m}$	$X_{\max} = 0,0229 \text{ m}$	$X_{\max} = 0,0235 \text{ m}$	$X_{\max} = 0,0233 \text{ m}$

Tableau4 : Les différents déplacements maximaux dus aux forces dynamiques $F_i(t)$ sur la structure

Type de contreventement	Niveau	travers	Élément	Moment fléchissant (kN.m)	Effort tranchant (kN)	Contrainte (mN/m^2)
sans contreventement	2	2	IPE300	35	14,61	64
contreventement en X			IPE300	17	5,25	23

Tableau5 : les valeurs des sollicitations dans l'élément IPE300 pour le cas où notre structure est soumise aux forces dynamiques $F_3(t)$

Globalement, les représentations graphiques obtenues depuis le traitement des résultats sur le logiciel MATLAB [9], marquent les déplacements des 4 types de structures dues à chacune des forces dynamiques appliquées ($F_1(t)$, $F_2(t)$, $F_3(t)$ et $F_4(t)$) en fonction du temps, comme illustrées respectivement sur les figures 6, 7, 8, et 9 suivantes :

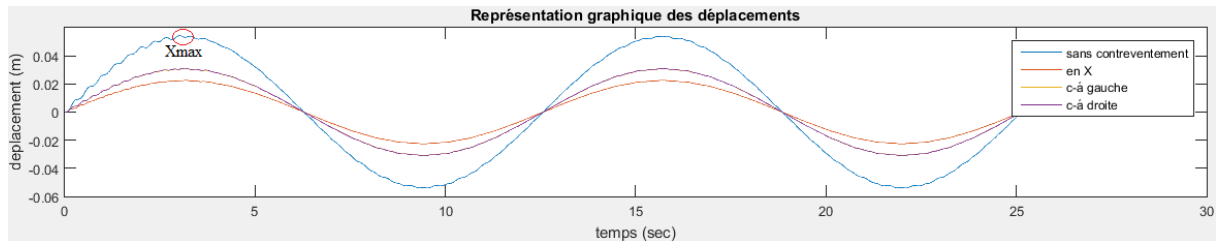


Figure6 : Les courbes représentant les déplacements dus aux Forces dynamiques $F_1(t)$ sur les 4 types de structures

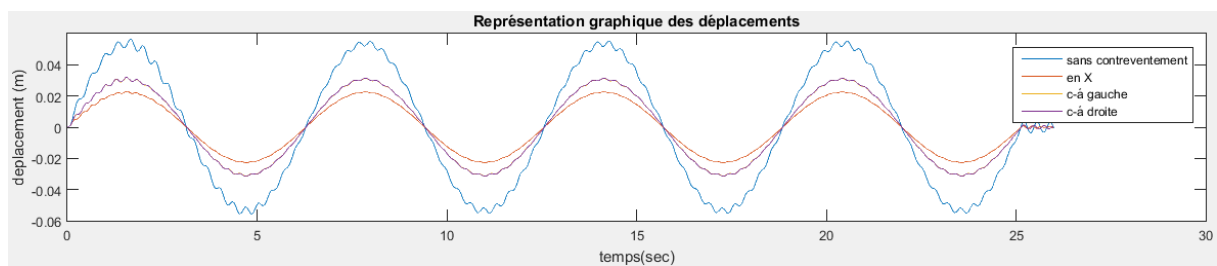


Figure7 : Les courbes représentant les déplacements dus aux Forces dynamiques $F_2(t)$ sur les 4 types de structures

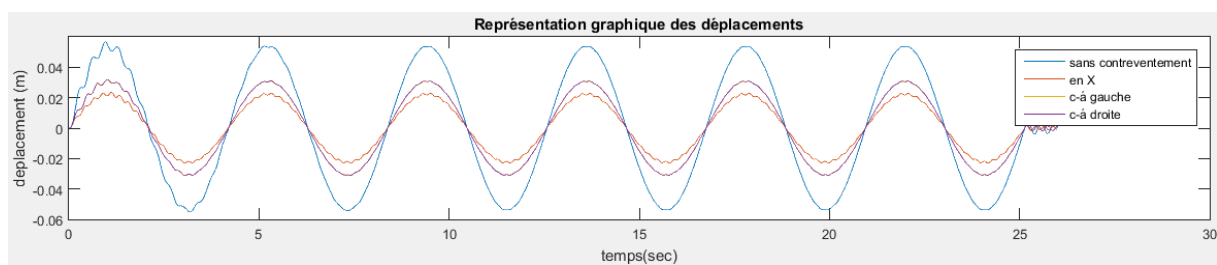


Figure8 : Les courbes représentant les déplacements dus aux Forces dynamiques $F_3(t)$ sur les 4 types de structures

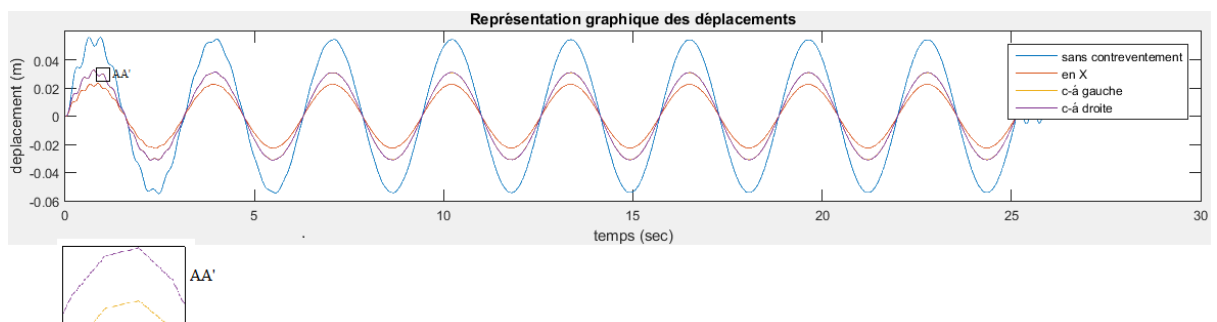


Figure9 : Les courbes représentant les déplacements dus aux Forces dynamiques $F_4(t)$ sur les 4 types de structures

- Comme indiqué sur la figure (10) et pour fin d'illustration, nous allons présenter le déplacement maximal du nœud contrôlé de la structure non renforcée :

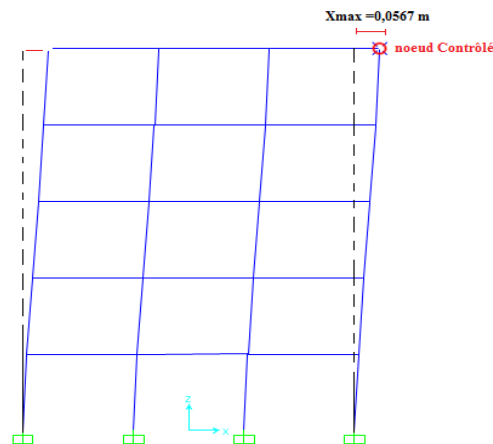


Figure10 : Illustration du déplacement maximal X_m pour le cas d'une structure sans contreventement soumise aux Forces dynamiques $F3(t)$

3. Conclusion :

Afin d'obtenir les déplacements maximaux et les sollicitations maximales pour chacun des cas étudiés, il est nécessaire d'identifier les chargements comme des charges non linéaires et d'adopter les différentes barres et les différents profilés des 1^{ère} et 2^{ème} classes travaillant en plasticité, en vue d'éviter la rupture de la structure à l'état limite élastique.

D'après l'analyse des résultats, il est à constater que le système de renforcement par les barres de contreventement vertical sert à minimiser les sollicitations, les déformations et les déplacements provoqués dans notre structure soumise aux forces dynamiques en assurant la stabilité de la structure vis-à-vis des effets horizontaux engendrés par les forces dynamiques appliquées sur la structure et stabilisant également les éléments structuraux (poutres, poteaux) dans la construction contre les phénomènes d'instabilité (flambage ou déversement).

Alors, d'après le tableau(4) nous constatons que le contreventement en x a donné les plus faibles valeurs de déplacements même en changeant les forces dynamiques. En outre, le tableau (5) illustre les valeurs des sollicitations dans un élément de structure(IPE300) dans le cas de la structure non-renforcée, et qui ont été maximales quant au cas où la structure est renforcée par le contreventement de type en X, les sollicitations ont pris leurs plus faibles valeurs.

D'après les résultats illustrés dans le tableau (5), nous constatons que :

- 1- Le Moment fléchissant (structure non-renforcée) est supérieur au Moment fléchissant (structure renforcée)
- 2- L'Effort tranchant (structure non-renforcée) est supérieur à l'Effort tranchant (structure renforcée)
- 3- la Contrainte (structure non-renforcée) est supérieure à la Contrainte (structure renforcée)

Tant que le contreventement de type en X a donné les plus faibles déformations, sollicitations et déplacements, nous pouvons conclure que ce type est plus résistant et constitue, donc, la solution la plus optimale pour réduire le maximum possible les risques et les endommagements. Autrement dit, ce renforcement par barres de contreventement vertical en X reflète une stabilité optimale par rapport aux autres types de renforcement.

Références :

- [1] R.brice, Modélisation numérique de structures formées des poutres sous sollicitations extrêmes travaux fin d'études , université de Liège – Faculté des sciences appliquées
- [2] L.geudre, cours éléments fini, école normale supérieure –paris Saclay
- [3] R.Abdelouahab Abderrezzak, étude du comportement des structures en acier sous sollicitations sismiques contreventées par amortisseurs a fluide visqueux. Université Aboubakr Belkaid –Tlemcen, Faculté de Technologie , (Thèse pour l'obtention du diplôme de docteur en sciences Spécialité : Génie civil)
- [4] SAP2000, logiciel de calcul en élément fini.
- [5] Help-Manuel utilization of software sap2000.
- [6] J. Morel, Calcul des structures métalliques, Eurocode3.
- [7] M. MABSSOUT, Cours de dynamique des structures, FST- Tanger.
- [8] Phu-Cuong Nguyen, Seung-Eock Kim, Nonlinear elastic dynamic analysis of space steel frames with semi-rigid connections, Journal of Constructional Steel Research 84 (2013) 72–81.
- [9] MATLAB (matrix-laboratory), logiciel de calcul numérique et de visualisation graphique.
 - S. Koriga, A.N.T. Ihaddoudene, M. Saidani , Numerical model for the non-linear dynamic analysis of multi-storey structures with semi-rigid joints with specific reference to the Algerian code. Istruc (2019).
 - S.Gowtham,M.Prakash, N.Parthasarathi, K.S.Satyanarayanan, V.Thamilarasu, 2D-Linear static and non-linear dynamic progressive collapse analysis of reinforced concrete building. ICRAMC_2017