

# Projet Digital Twin en vibrations

Novembre 2020- Février 2021

Nom : Lin GUO

Tuteur : Bernard Laulagnet [jerome.bruvere@insa-lyon.fr](mailto:jerome.bruvere@insa-lyon.fr);



Champ d'éolienne off-shore

## **PLAN DU RAPPORT**

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>POUTRE ENCASTRE-LIBRE: MAILLAGE SOUS ANSYS MECA AVEC DES ELEMENTS FINIS COQUE</b>	<b>4</b>
2.1	RAPPELS THEORIQUE	4
2.2	ELEMENT FINIS COQUE	4
2.3	EXEMPLE POUR UNE POUTRE AUX CONDITIONS AUX LIMITES ENCASTRES-LIBRE	5
<b>3</b>	<b>POUTRE ENCASTREE-ENCASTREE: MAILLAGE POUR ELEMENTS FINIS TRIDIMENSIONNEL</b>	<b>8</b>
3.1	ELEMENTS 3D HEXAEDRIQUES	8
3.2	EXEMPLE POUR 1 POUTRE ENCASTREE-ENCASTREE DE 10 CM D'EPATISSEURS	8
<b>4</b>	<b>ETUDE D'UNE MODIFICATION DE LA GEOMETRIE PLUS OU MOINS IMPORTANTE</b>	<b>11</b>
4.1	EFFET D'UN RAINURAGE	11
4.2	EFFET D'UN AFFAIBLISSEMENT D'EPATISSEUR	14
4.3	EFFET D'UN TROU	17
<b>5</b>	<b>ETUDE D'INFLUENCE D'UN SUPPORT</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>ETUDE DU DEBOULONNAGE DU TUBE</b>	<b>25</b>
6.1	2 TUBES ASSEMBLES LIBRE-LIBRE	26
6.2	2 TUBES ASSEMBLES ENCASTRE-LIBRE	33
6.3	3 TUBES LIBRE-LIBRE	34
<b>7</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAPHY</b>	<b>37</b>
<b>9</b>	<b>ANNEXE</b>	<b>37</b>

# 1 Introduction

Morphosense est une entreprise qui commercialise des capteurs multifonctions. Les capteurs sont reliés ensembles par fibre optique, de manière linéaire, jusqu'à une vingtaine d'individus et communiquent en continu, via la téléphonie mobile, à des stations de mesures. Ces systèmes sont tout à fait dédiés pour effectuer de la mesure au fil de l'eau et à la surveillance vibratoire notamment, dans la bande inférieure à 1000 Hz. L'enregistrement en continu des signaux vibratoires permet de suivre l'évolution des structures et leur vieillissement. Notamment le secteur de l'éolien se prête à ce type de surveillance parce que de nombreux secteurs de l'éolien sont situés en mer, il est très difficile de vérifier fréquemment leur état par l'homme.

Morphosense cherche à monter en compétence dans le suivi des éoliennes. Dans ce cadre général, on se propose de les accompagner sur le concept de Digital Twin. Ce concept tente en temps réel de recaler un modèle mécanique ici, en dynamique vibratoire, avec des mesures sur la structure réelle. Par calcul Eléments Finis, on dimensionnera cette poutre pour obtenir ses fréquences propres, puis toujours par calcul on modifiera ses conditions aux limites.

Parce que ces éoliennes vibrent souvent sous la force du vent en mer, les boulons peuvent tomber après un certain temps, de sorte que l'éolienne ne peut pas fonctionner normalement. Notre objectif final est d'utiliser ANSYS MECA pour simuler la chute du boulon à différentes positions et calculer le changement de fréquence propre. Dans les applications pratiques, en surveillant en temps réel la fréquence intrinsèque de l'éolienne, il est possible de savoir s'il y a un défaut et où il se trouve.



**Photos de la maquette du mât de l'éolienne et du boulonnage**

## 2 : Maillage sous ANSYS MECA avec des éléments finis coque

### 2.1 Rappels théorique

Ici, on rappelle le principe mathématique pour obtenir les fréquences et vecteurs propres d'un problème de vibration. La première chose à comprendre est l'équation de base du problème vibratoire discréétisé par la méthode des éléments finis. On a :

$$[M](-\omega^2\{x\}e^{-j\omega t})+[K](xe^{-j\omega t})=0 \text{ Où}$$

[M] Matrice de masse assemblée du modèle

[K] Matrice de rigidité assemblée du modèle

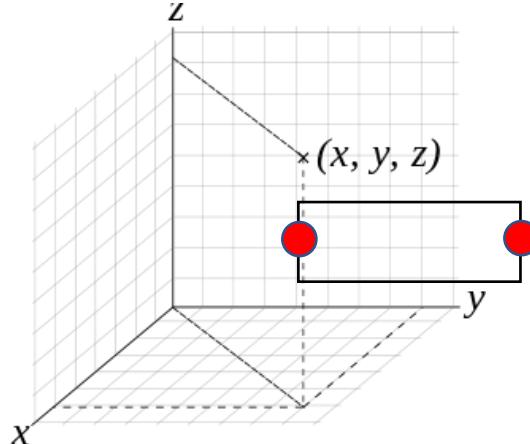
On obtient :

$$[M^{-1}][K]\{x\} = \omega^2\{x\}$$

On déduit de ce problème aux valeurs propres que les valeurs propres de la matrice  $A=[M^{-1}][K]$  sont identifiables aux carrés des pulsations propres du problème vibratoire :

$$\lambda = \omega^2$$

### 2.2 Elément finis coque



Parce que l'épaisseur de la poutre est très petite, il n'y a qu'un seul élément lors de la division du maillage dans le sens de l'épaisseur. Nous nous concentrerons sur un élément et ses deux nœuds, nœuds 1 et nœuds 2.

Le nœud a 6 degrés de liberté, 3 degrés de liberté pour le déplacement (le long des directions x, y, z) et 3 degrés de liberté pour la rotation (autour des axes x, y, z).

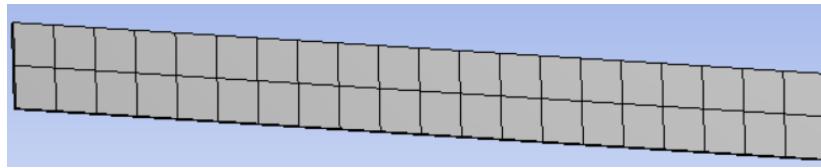
Cette méthode de maillage s'appelle élément finis coque.

## 2.3 Exemple pour une poutre aux conditions limites Encastrés-

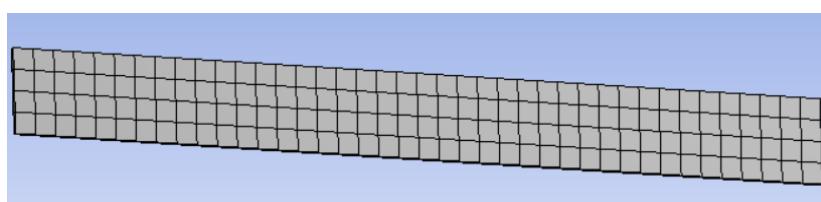
### Libre

Prenons l'exemple d'une poutre de 1 cm d'épaisseur de 2 m de longueur, de 20 cm de largeur. Regardons l'influence de la sensibilité au maillage de cette poutre et effectuons une étude de convergence, dans le cas d'une poutre encastrée-libre.

Tout d'abord, j'ai trouvé que lorsque je réduis la taille du maillage, la fréquence propres changent également :

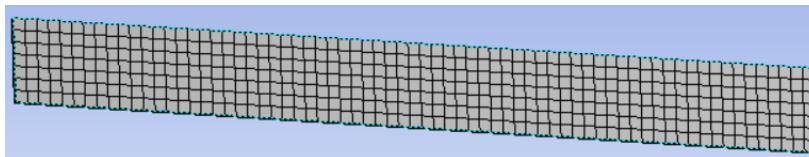


	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	2.0621
2	2.	12.918
3	3.	36.188
4	4.	39.962
5	5.	40.546
6	6.	70.995
7	7.	117.56
8	8.	120.53
9	9.	176.
10	10.	203.03
11	11.	243.35
12	12.	246.48
13	13.	288.67
14	14.	329.23
15	15.	378.6
16	16.	424.56
17	17.	473.92
18	18.	532.9
19	19.	575.62
20	20.	631.9



	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	2.0572
2	2.	12.887
3	3.	36.104
4	4.	39.613
5	5.	40.519
6	6.	70.833
7	7.	117.28
8	8.	119.48
9	9.	175.5
10	10.	201.24
11	11.	243.09
12	12.	245.54
13	13.	286.1
14	14.	327.44
15	15.	375.17
16	16.	421.2
17	17.	469.46
18	18.	526.8
19	19.	569.87
20	20.	631.82

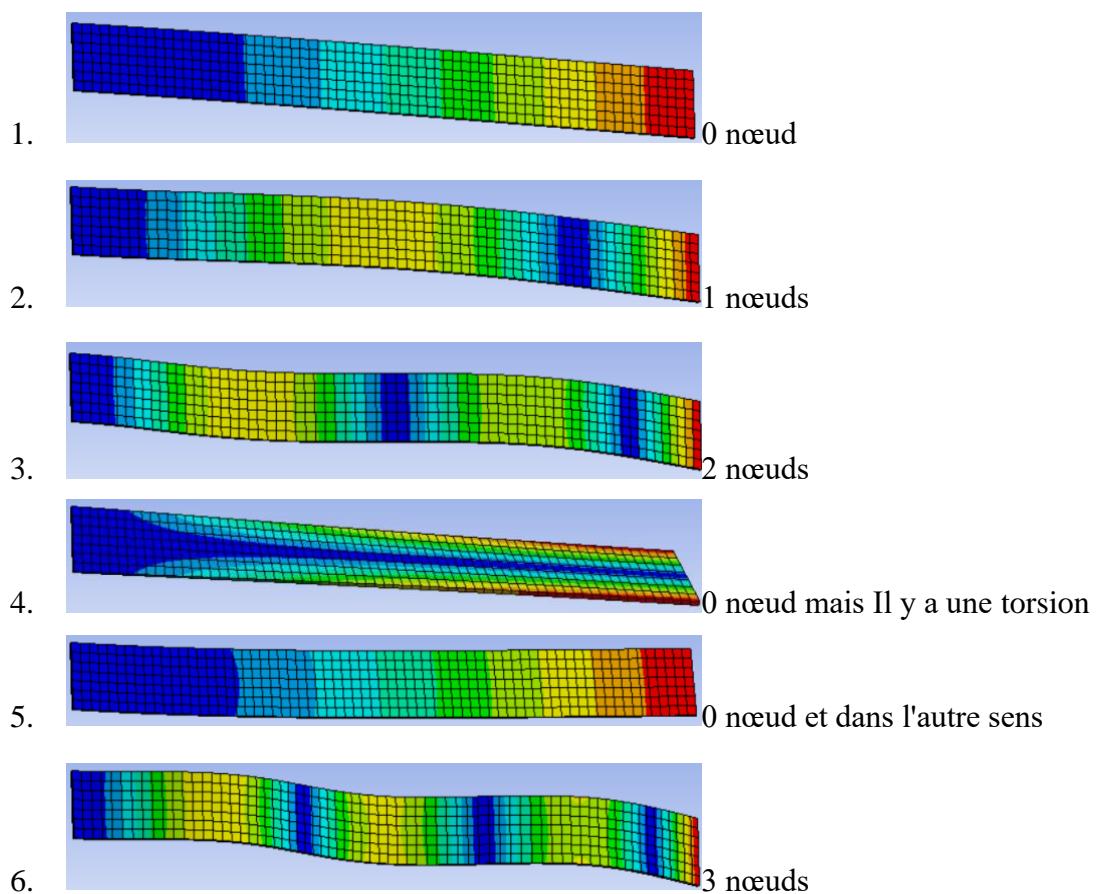
	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1	1.	2.0549
2	2.	12.873
3	3.	36.063
4	4.	39.524
5	5.	40.512
6	6.	70.753
7	7.	117.14
8	8.	119.21
9	9.	175.29
10	10.	200.79
11	11.	243.03
12	12.	245.24
13	13.	285.47
14	14.	327.01
15	15.	374.34
16	16.	420.58
17	17.	468.42
18	18.	525.93
19	19.	568.61
20	20.	631.78

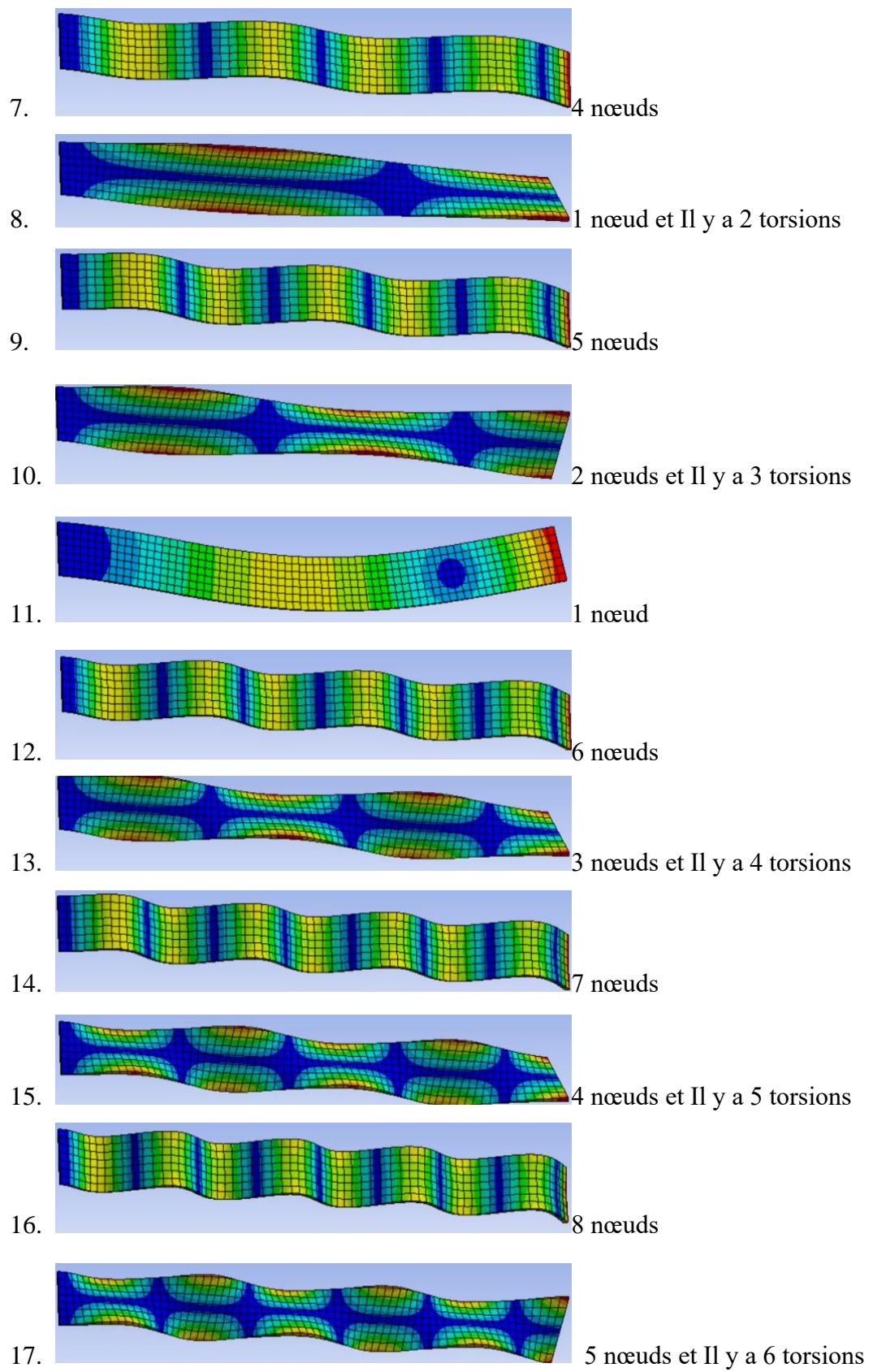


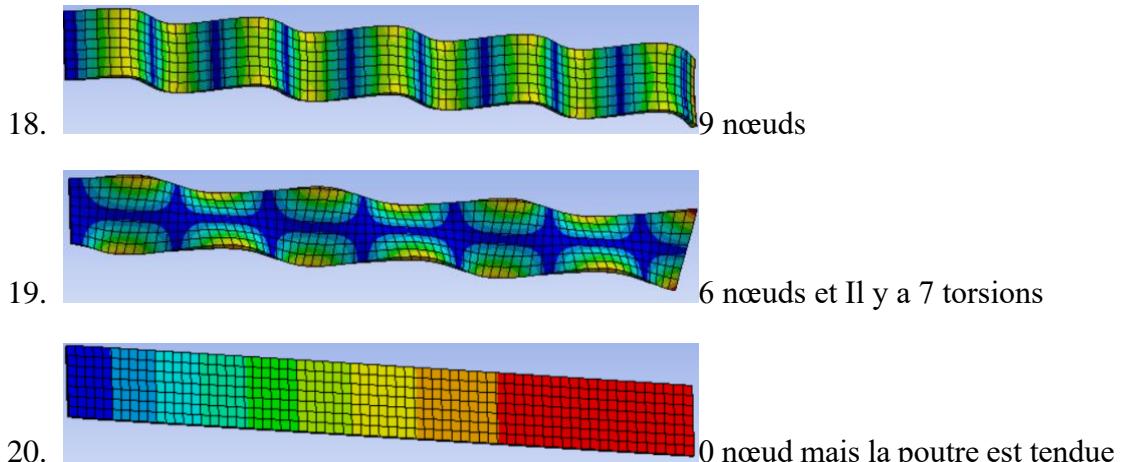
### Evolution des 20 premières fréquences propres avec le maillage en éléments coque

J'ai trouvé que lorsque la densité du maillage est suffisamment petite, la fréquence propre a tendance à converger. Donc après cela, je vérifierai si le maillage répond aux exigences à chaque fois que je simule

Puis je choisis le plus petit maillage pour observer les 20 premières fréquences



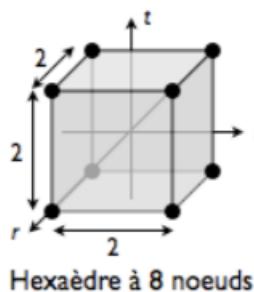




**Représentation des 20 premières déformées propres**

### 3 Poutre Encastrée-Encastrée : maillage pour éléments finis tridimensionnel

#### 3.1 Eléments 3D hexaédriques



Lorsque la poutre devient « épaisse » dans le sens de l'épaisseur, on utilise des éléments finis « tri-dimensionnel » de type hexaédrique, avec un nœud par sommet. A chaque nœud de l'élément, on suppose que les déplacements admissibles sont selon les 3 directions de l'espace (le long des directions x, y, z). Il y a donc 24 inconnues de déplacement par élément finis tridimensionnel.

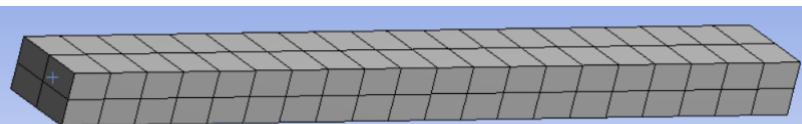
Il existe plusieurs paires d'éléments à la baisse dans le sens de l'épaisseur, on utilise manière élément 3D, pour chaque nœud, il y a 8 nœuds pour chaque nœud il y a 3 degrés de liberté pour le déplacement (le long des directions x, y, z)

#### 3.2 Exemple pour 1 poutre Encastrée-Encastrée de 10 cm d'épaisseurs

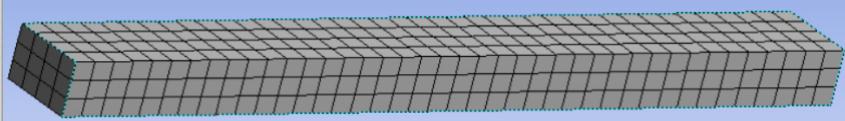
Ici j'ai augmenté l'épaisseur de la poutre donc maintenant c'est une poutre de 10 cm d'épaisseur de 2 m de longueur, de 20 cm de largeur. Les éléments sont des éléments tridimensionnels

J'ai obtenu les résultats suivants :

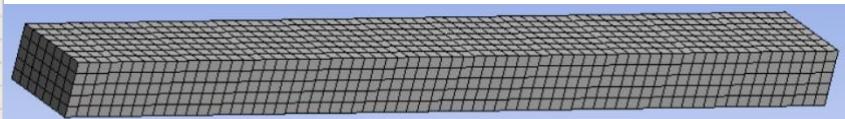
	Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1.	158.99
2	2.	245.91
3	3.	424.76
4	4.	631.27
5	5.	659.43
6	6.	801.3
7	7.	1142.9
8	8.	1267.5
9	9.	1268.7
10	10.	1320.
11	11.	1738.5
12	12.	1805.6
13	13.	1982.9
14	14.	2391.6
15	15.	2400.8
16	16.	2533.5
17	17.	2649.2
18	18.	3041.5
19	19.	3084.6
20	20.	3320.2



	Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1.	158.6
2	2.	245.3
3	3.	423.63
4	4.	629.38
5	5.	656.19
6	6.	798.89
7	7.	1139.
8	8.	1263.1
9	9.	1268.
10	10.	1313.5
11	11.	1731.7
12	12.	1798.1
13	13.	1973.
14	14.	2380.8
15	15.	2388.6
16	16.	2532.3
17	17.	2635.7
18	18.	3022.2
19	19.	3068.4
20	20.	3302.3

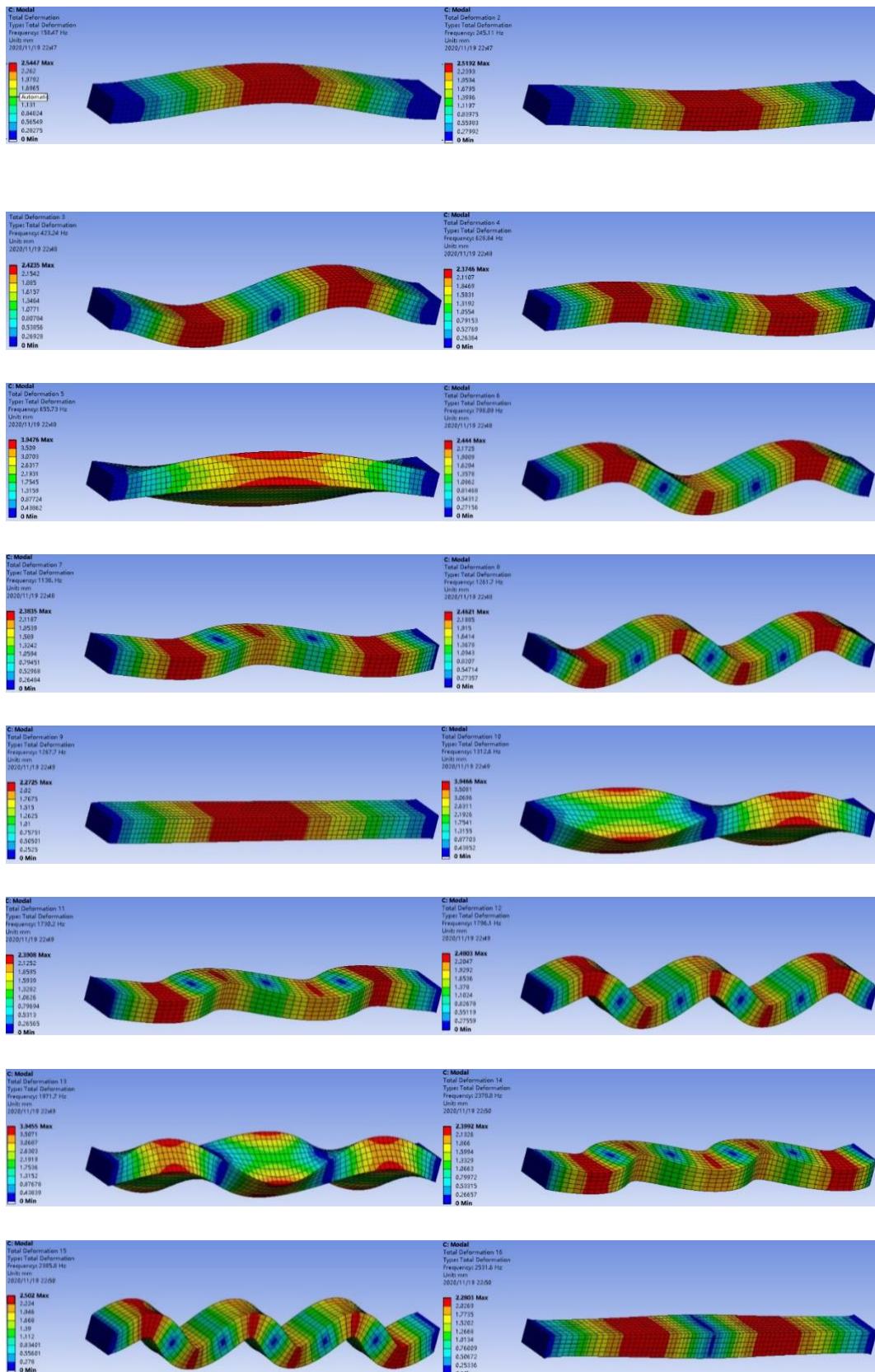


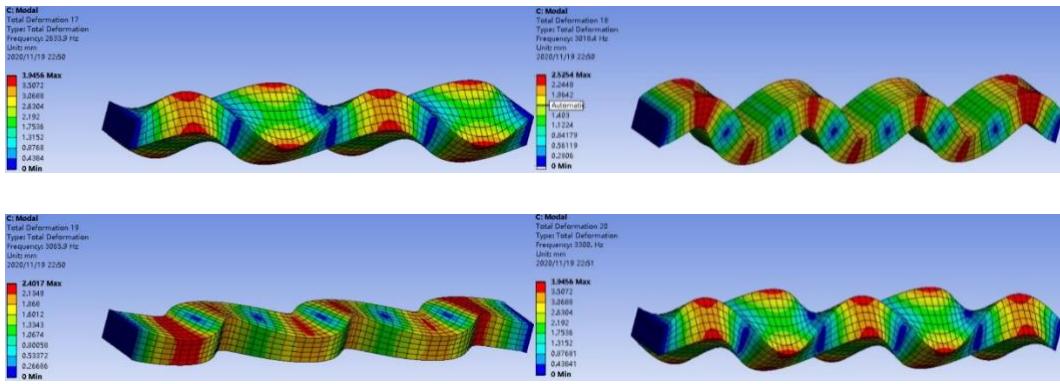
	Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1.	158.47
2	2.	245.11
3	3.	423.24
4	4.	628.84
5	5.	655.73
6	6.	798.09
7	7.	1138.
8	8.	1261.7
9	9.	1267.7
10	10.	1312.6
11	11.	1730.2
12	12.	1796.1
13	13.	1971.7
14	14.	2378.8
15	15.	2385.8
16	16.	2531.6
17	17.	2633.9
18	18.	3018.4
19	19.	3065.9
20	20.	3300.



### Evolution des 20 premières fréquences propres avec le maillage en éléments coque

De la même manière, je choisis le plus petit maillage pour observer les 20 premières fréquences





Représentation des 20 premières déformées propres

## 4 Etude d'une modification de la géométrie plus ou moins importante

### 4.1 Effet d'un rainurage

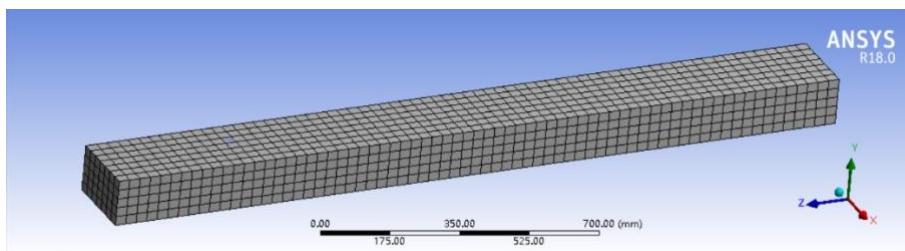
J'ai essayé de changer la forme de la poutre comme indiqué ci-dessous pour chercher son influence sur les fréquences et déformées propres

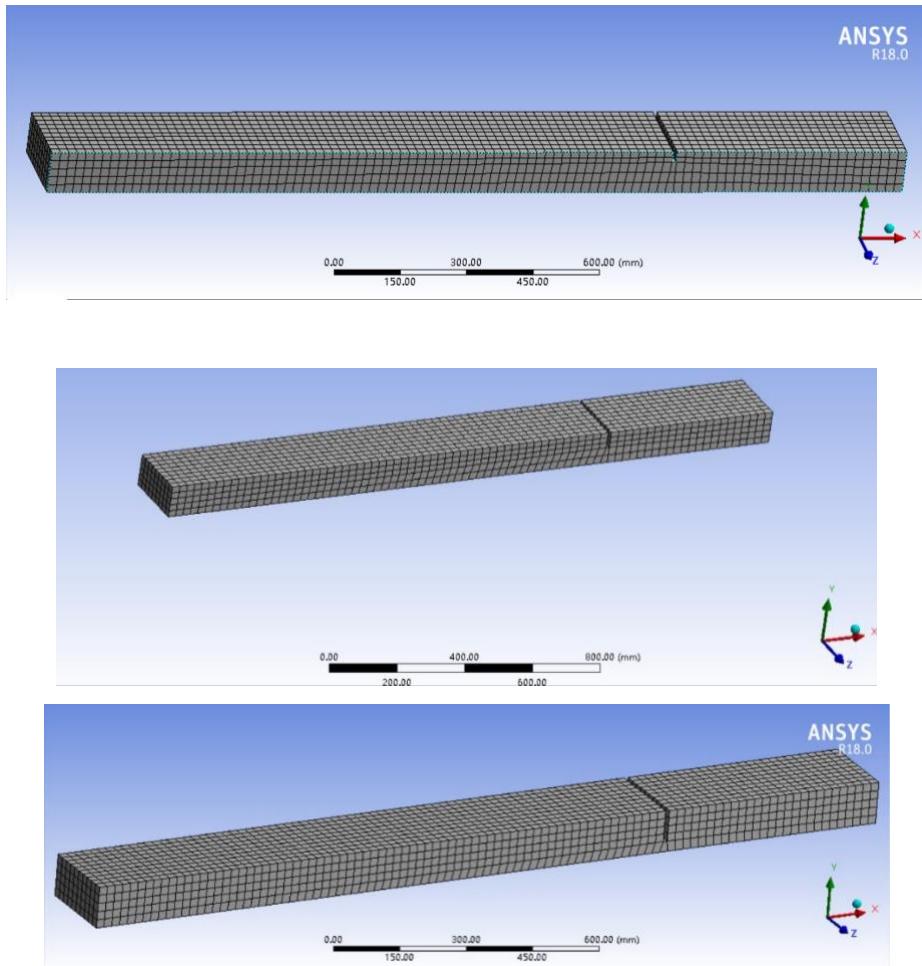
J'ai d'abord placé un défaut de 10 mm de large sur la moitié droite de la poutre. La profondeur du défaut est respectivement de 25%, 50% et 75% de l'épaisseur de la poutre. On la considère comme un petit défaut



Rainurage de la poutre selon des profondeurs différentes

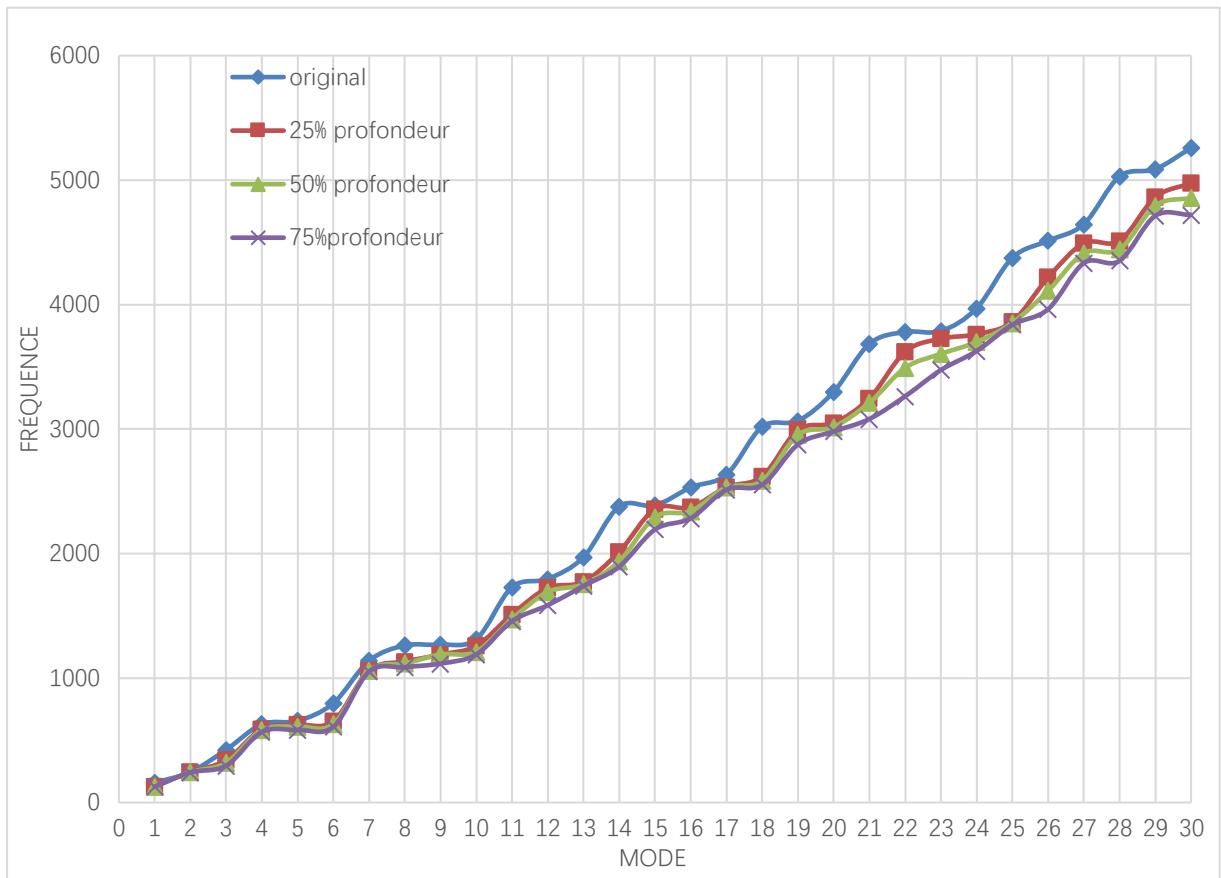
Et j'ai créé un maillage avec la même densité dans ANSYS





### Différents maillages pour la poutre rainurée

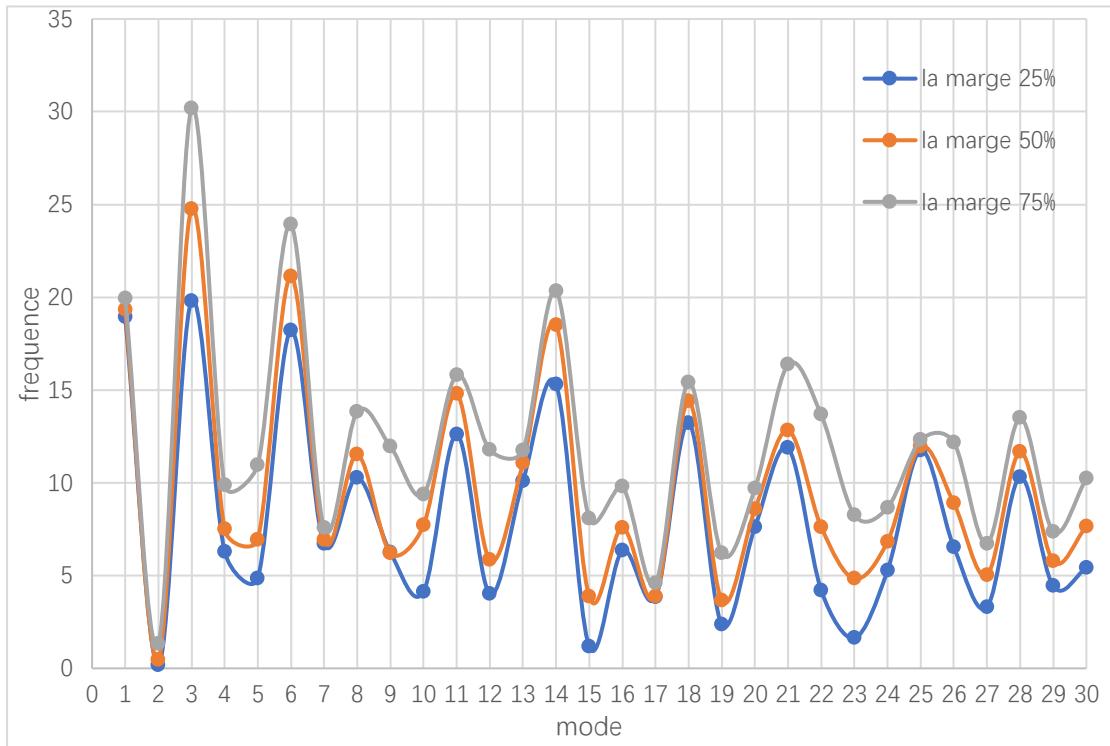
Et j'ai analysé les 30 premières fréquences propres.



### Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre

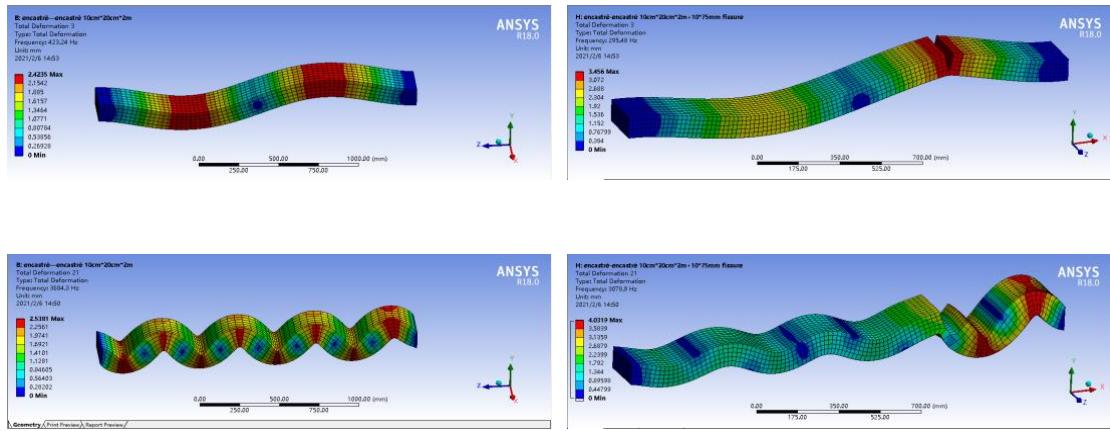
J'ai fait un tableau de leur différence de fréquence propre (unité : %)

De cette façon, nous pouvons voir combien la fréquence propre de la poutre a changé après l'ajout de défauts



**Evolution de la fréquence propre en pourcentage en fonction du numéro du mode**

À travers l'image ci-dessus, j'ai choisi les modes les plus influents et comparé leur déformation

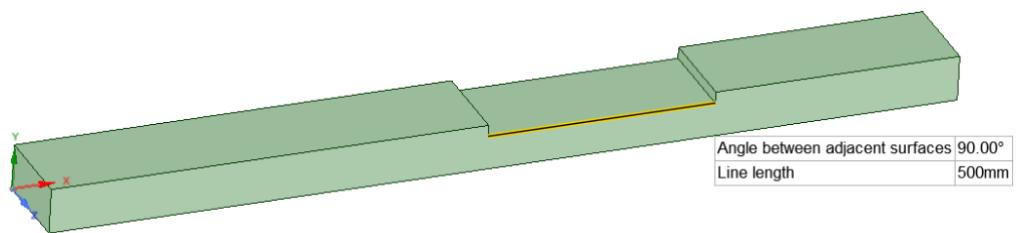


**Représentation déformées propres (mode 3 et mode 21)**

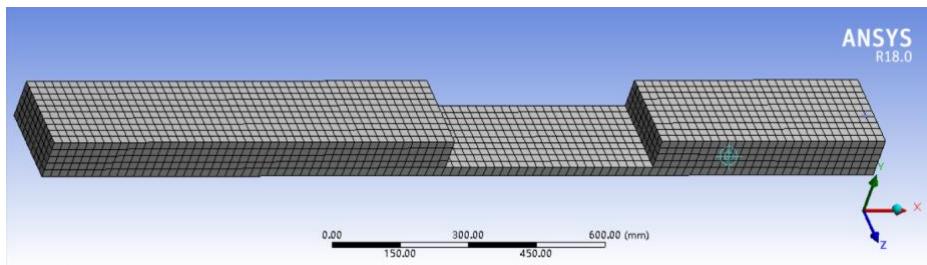
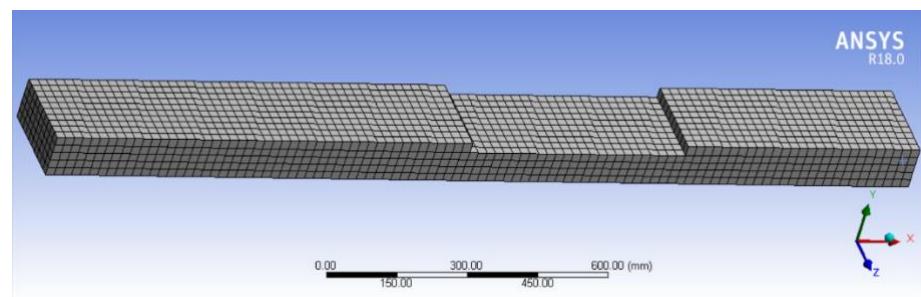
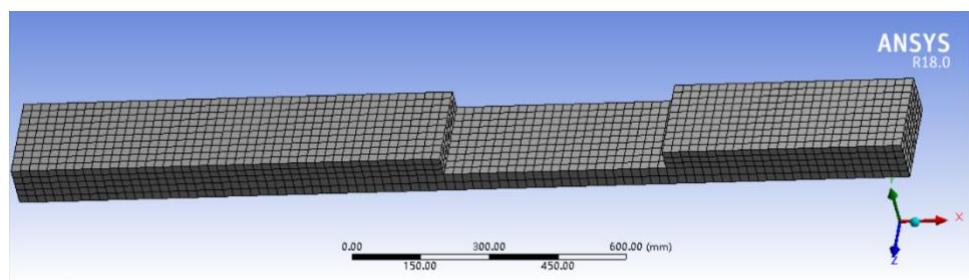
Il est évident d'après la figure que l'ajout de défauts diminue la rigidité de la poutre. Plus le défaut est important, plus la rigidité diminue. Néanmoins ce type de défaut perturbe tous les modes calculés , bien que le défaut soit de petite taille.

## 4.2 Effet d'un affaiblissement d'épaisseur

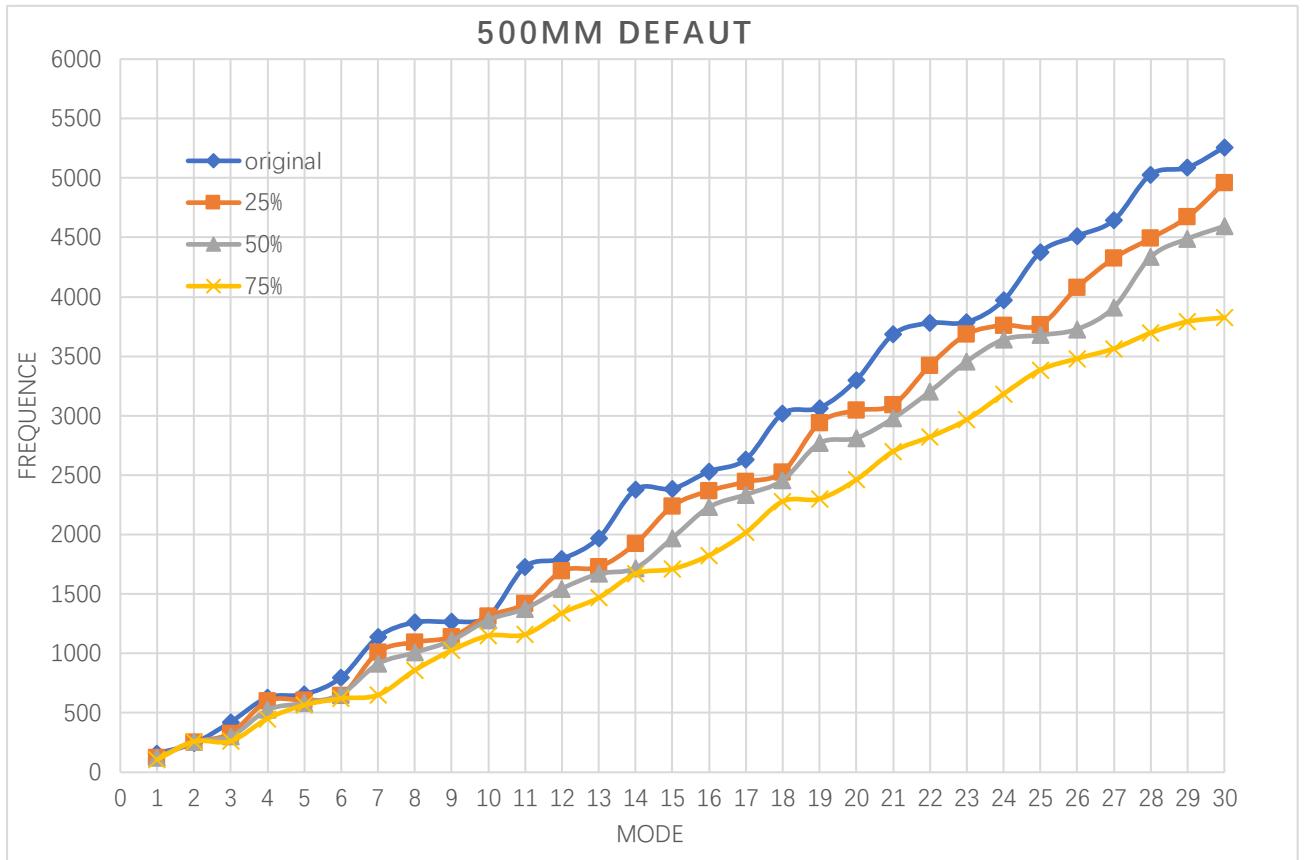
Pour la deuxième fois, j'ai augmenté la largeur du défaut à 500 mm



**Affaiblissement d'épaisseur de la poutre selon des profondeurs différentes**

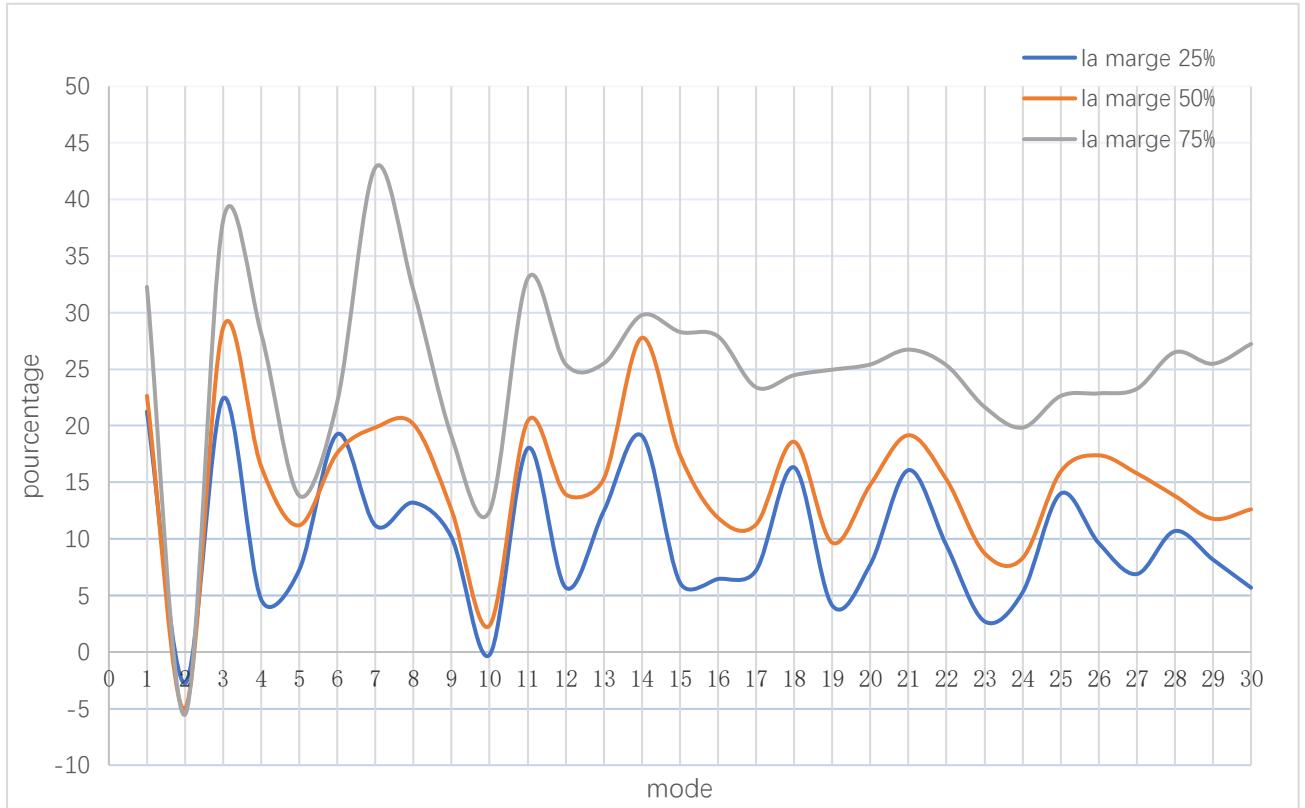


**Différents maillages pour la poutre rainurée**



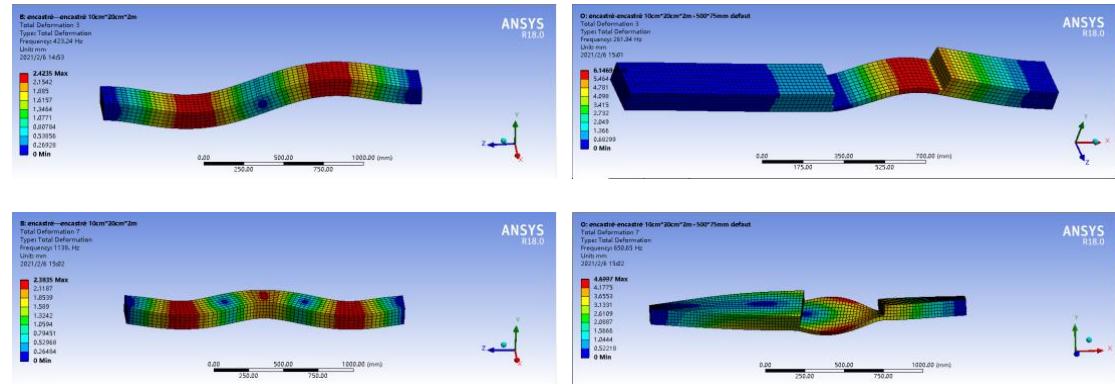
**Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre**

Ensuite, j'utilise la même méthode que le défaut mineur



## Evolution de la fréquence propre en pourcentage en fonction du numéro du mode

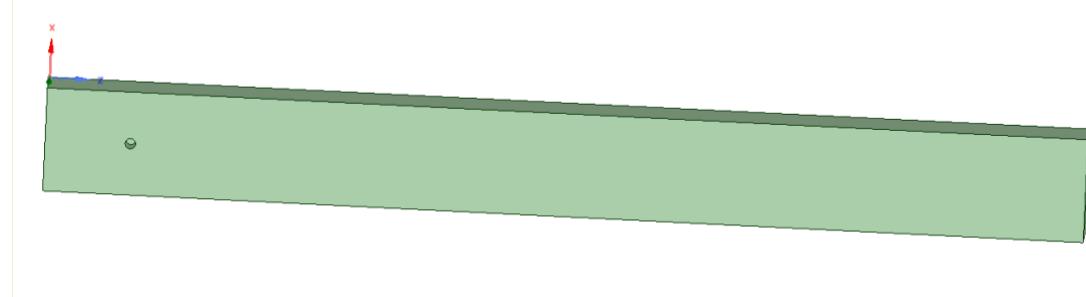
On constate encore que tous les modes sont affectés par cet affaiblissement d'épaisseur. De même, j'ai choisi les modes les plus influents et comparé leur déformation



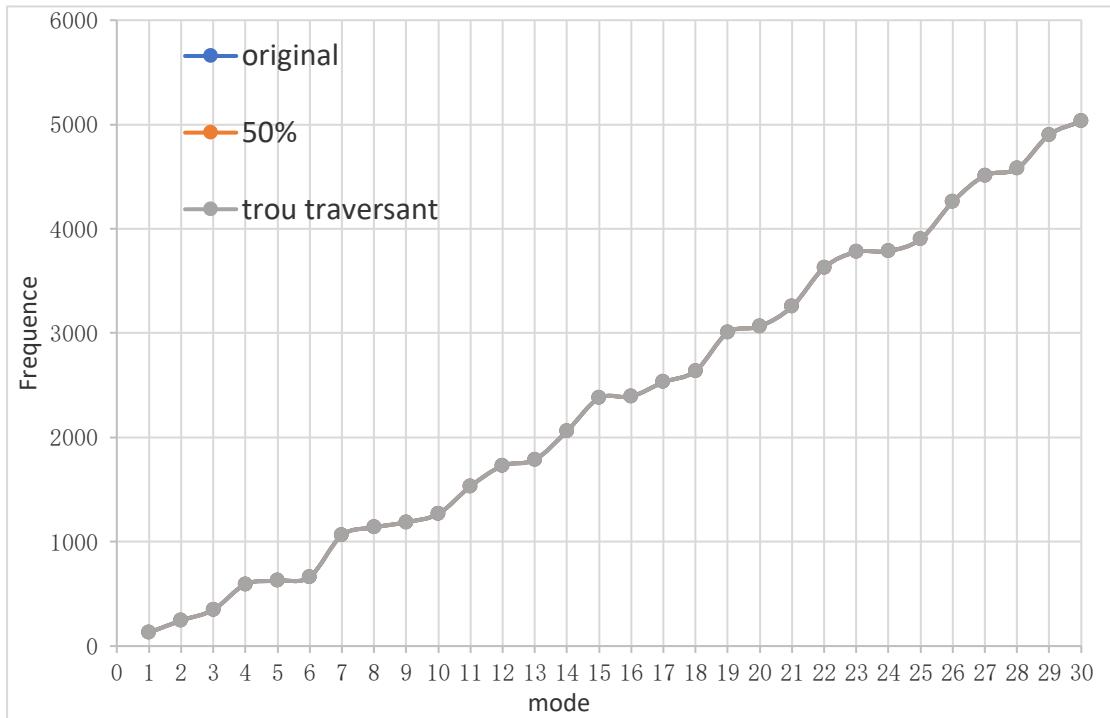
Représentation déformées propres (mode 3 et mode 7)

### 4.3 Effet d'un trou

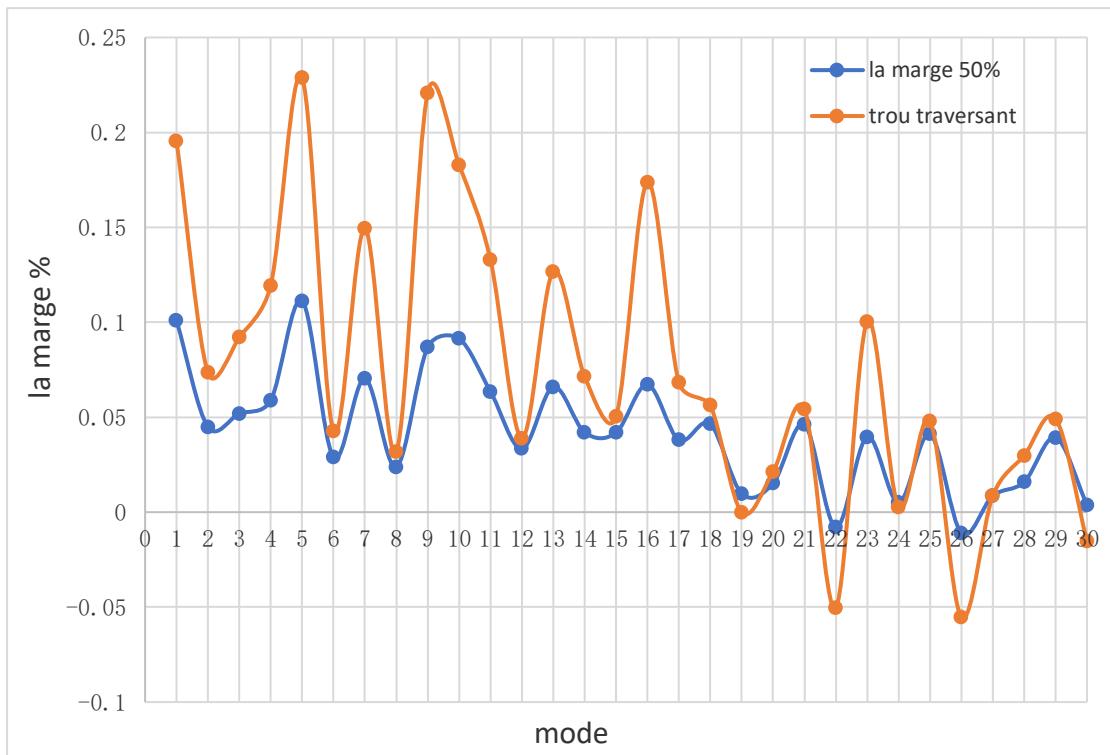
Poutre avec un trou de diamètre 10 mm



Présence d'un trou dans la poutre situé X=164 mm Y=100 mm de différentes profondeurs

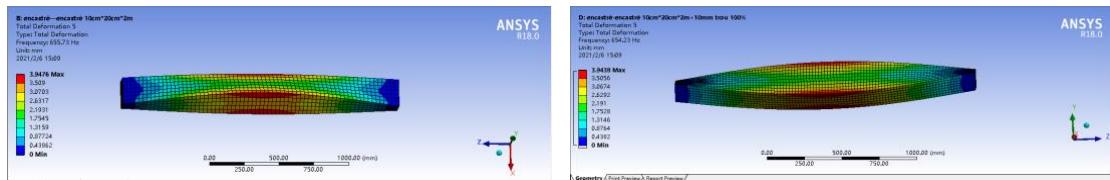


**Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre**



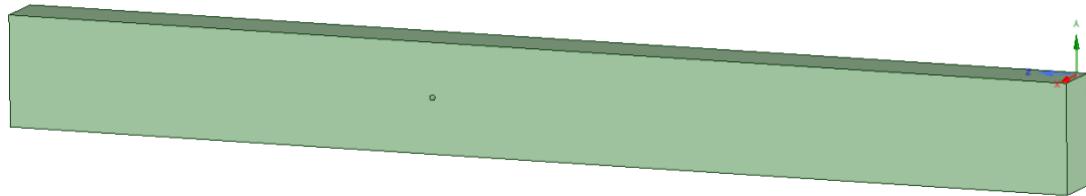
**Evolution de la fréquence propre en pourcentage en fonction du numéro du mode**

Lorsque la différence de fréquence propre est la plus grande, seulement 0,2%.

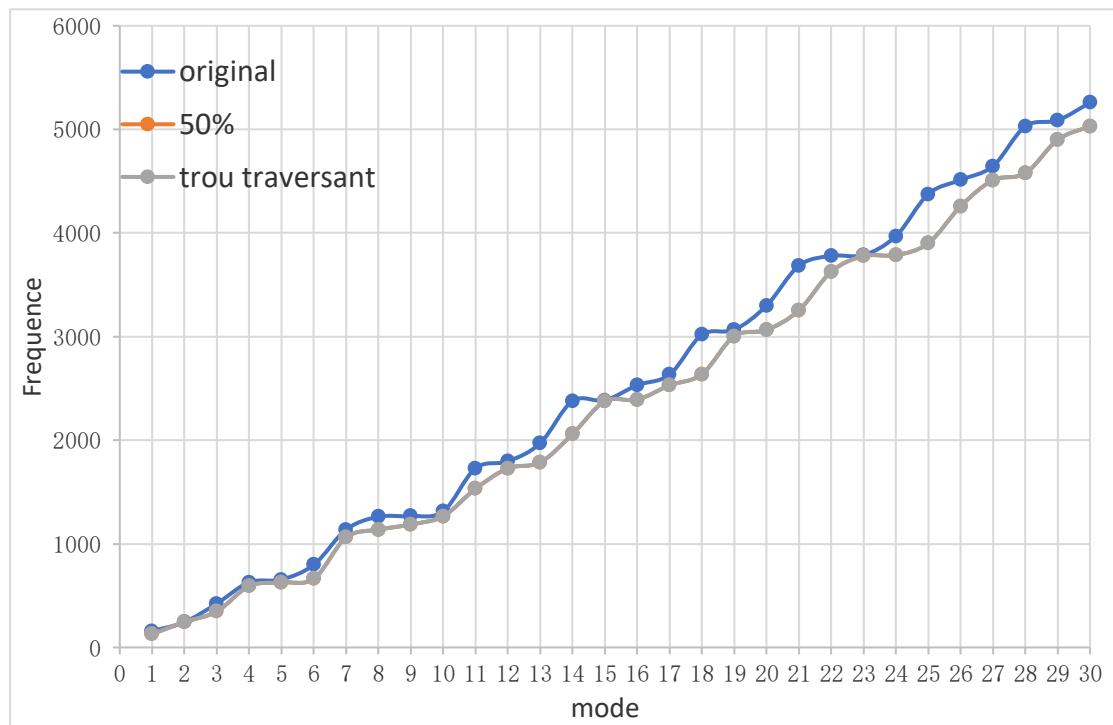


### Représentation déformées propres (mode 5)

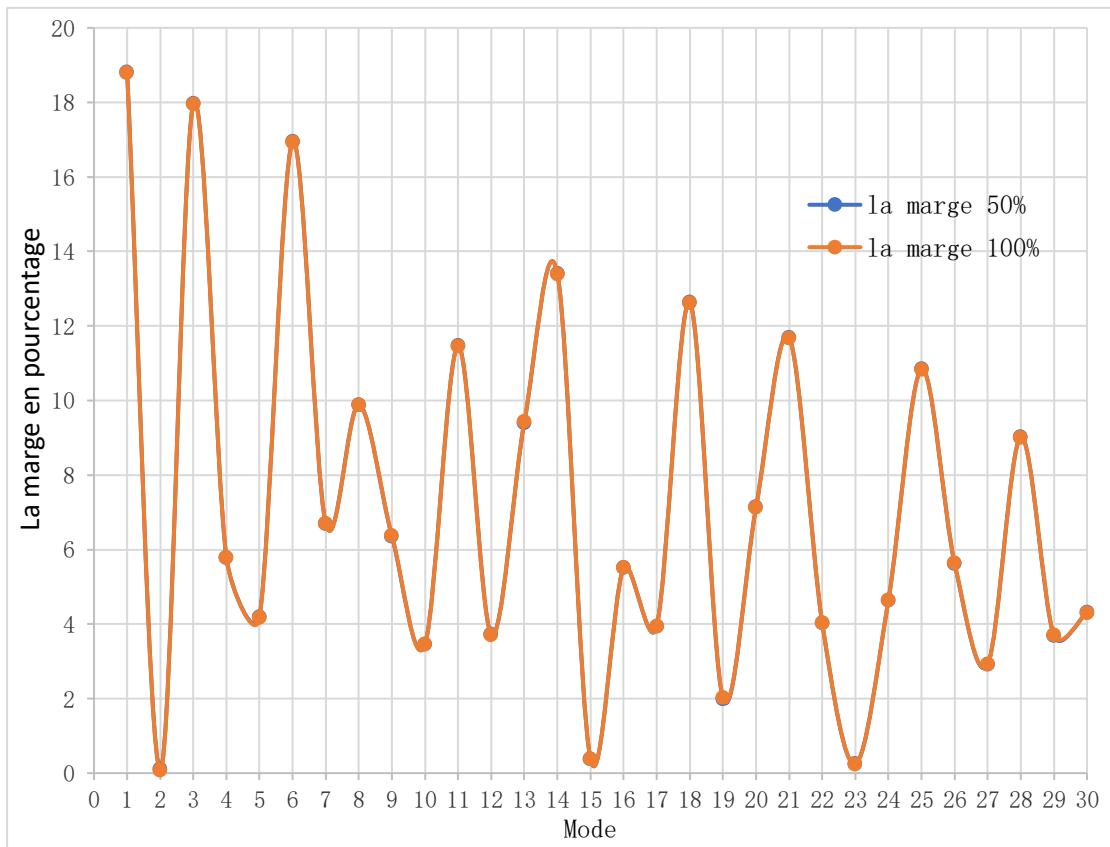
D'après les résultats, le trou a très peu d'effet sur la fréquence propre de la poutre. Je pense que cela peut être causé par la position du trou trop près des limites du système. Alors j'ai repositionné le trou et je l'ai simulé à nouveau



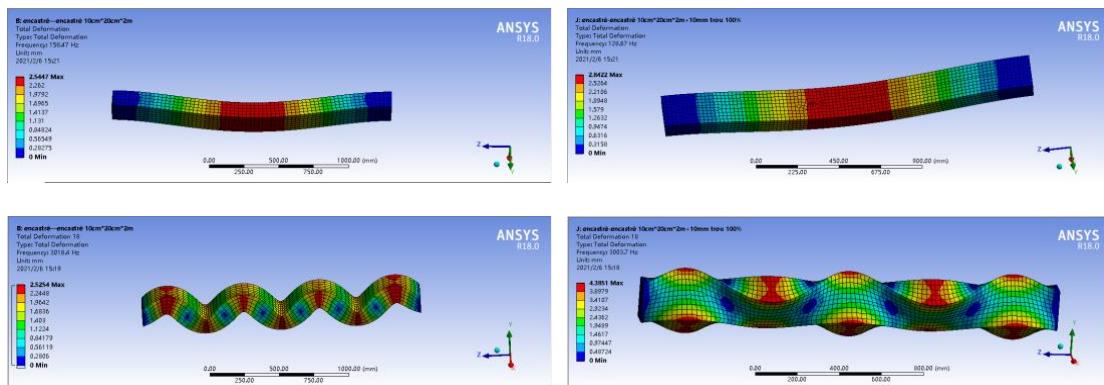
### Présence d'un trou dans la poutre situé X=800 mm Y=100 mm de différentes profondeurs



### Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre

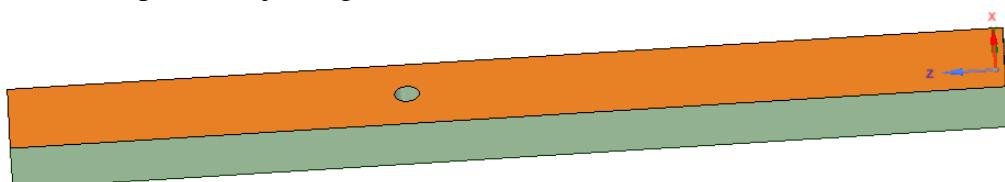


**Evolution de la fréquence propre en pourcentage en fonction du numéro du mode**

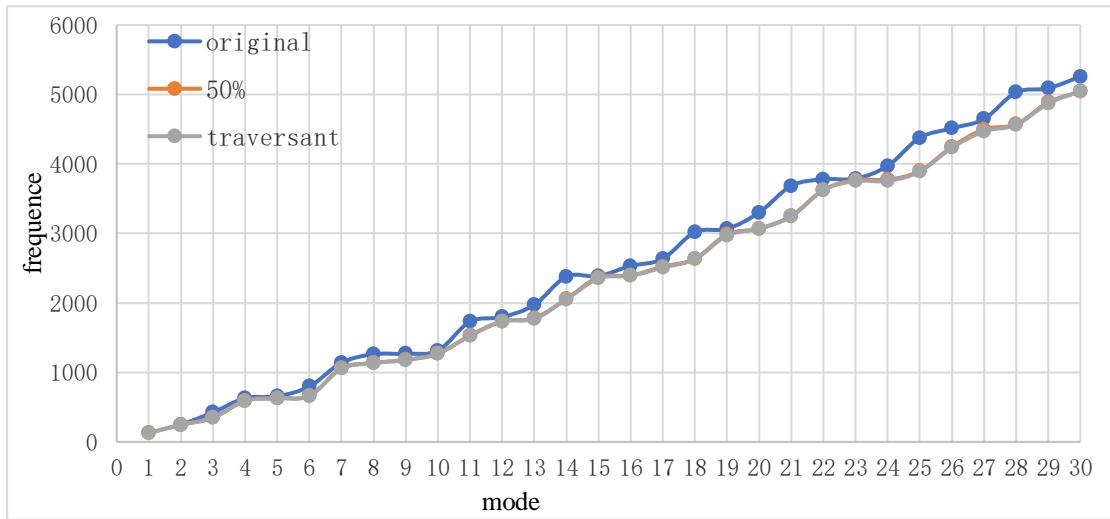


**Représentation déformées propres (mode 1, mode 18)**

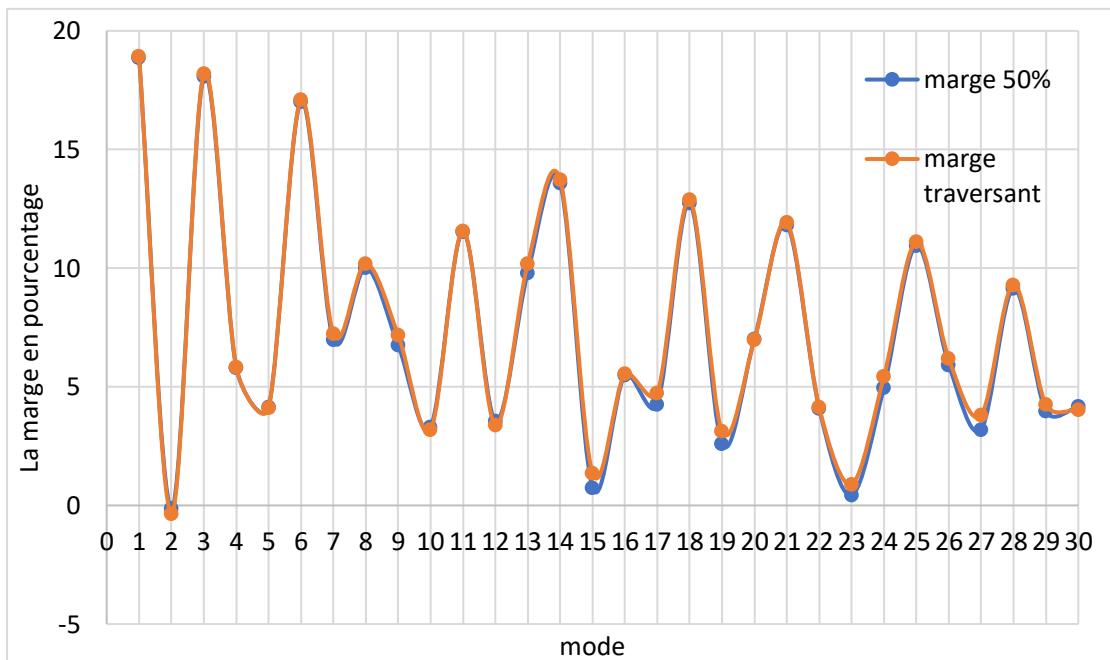
A titre de comparaison, j'ai augmenté le diamètre du trou d=50 mm à x = 800 mm



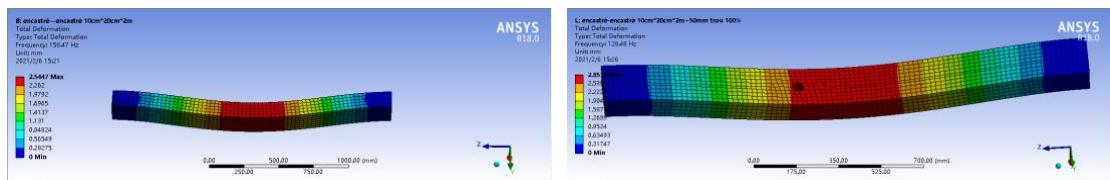
**Présence d'un trou de 50 mm dans la poutre de différentes profondeurs, en x = 800 mm**

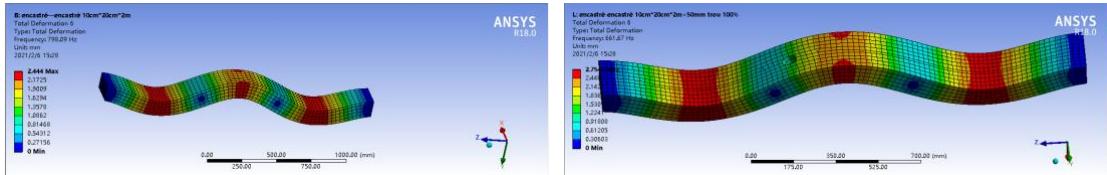


Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre



Evolution de la fréquence propre en pourcentage en fonction du numéro du mode





**Représentation déformées propres (mode 1, mode 6)**

## 5 Etude d'influence d'un support

On s'intéresse dorénavant à l'influence d'un support élastique sur les fréquences propres d'une poutre. On commence par un support en acier identique à la poutre.

Matériau	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	Module de Young E [Gpa]	Coefficient de Poisson v
----------	--------------------------------------	-------------------------	--------------------------

caoutchouc naturel	920 à 990	2,2 à 2,7	-0,5
Properties of Outline Row 3: caoutchouc			
A	B	C	
Property	Value	Unit	
Material Field Variables	Table		
Density	950	kg m <sup>-3</sup>	
Isotropic Elasticity			
Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
Young's Modulus	2.5E+09	Pa	
Poisson's Ratio	0.4		
Bulk Modulus	4.1667E+09	Pa	
Shear Modulus	8.9286E+08	Pa	

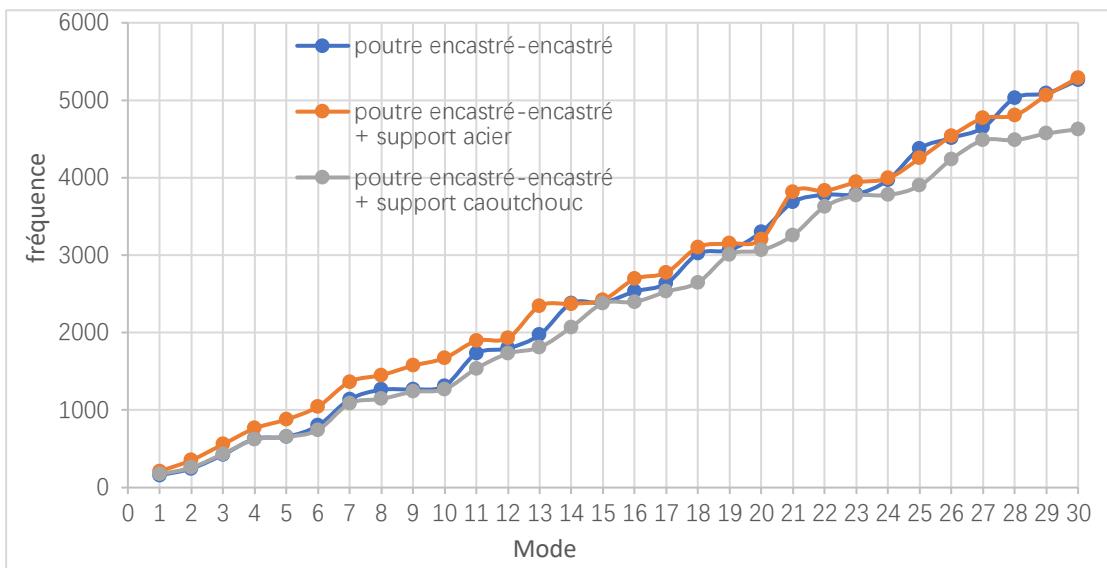
### Caractéristiques caoutchouc

Pour la première fois, j'ai ajouté une base en acier de 20 cm \* 10 cm \* 10 cm sous la poutre acier encastré-encastré.

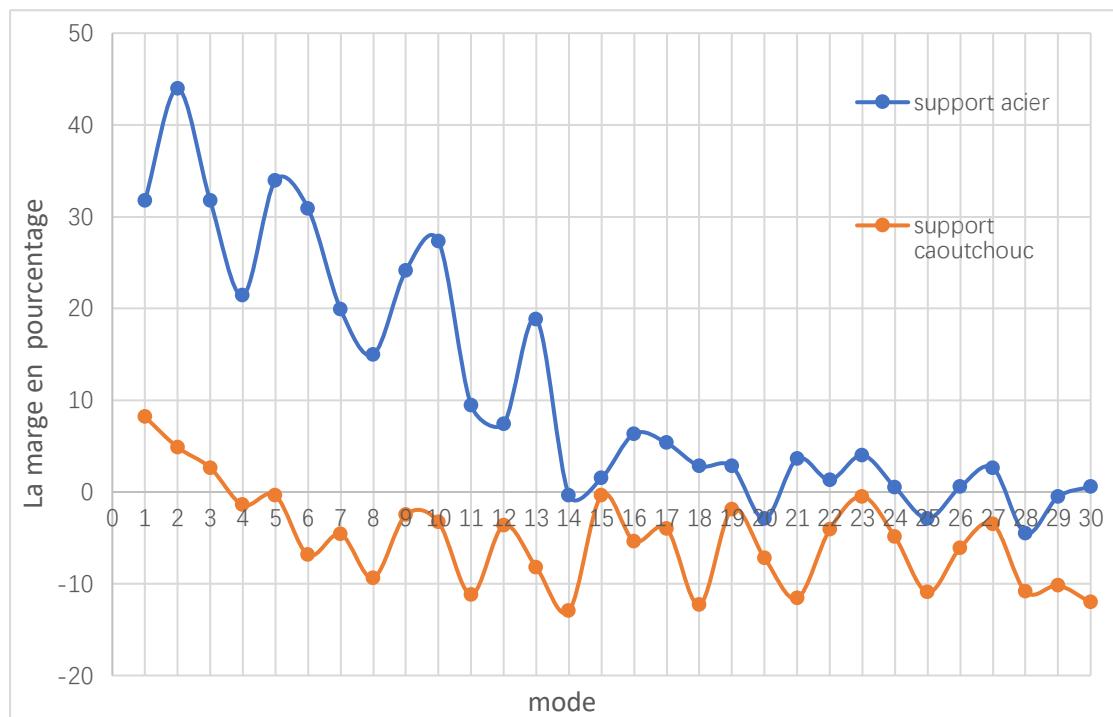
Pour la deuxième fois, j'ai ajouté une base en caoutchouc de la même taille sous la poutre acier encastré-encastré.

Ensuite je compare les trois situations suivantes en même temps :

- Poutre encastré-encastré sans support
- Poutre encastré-encastré + support acier
- Poutre encastré-encastré + support caoutchouc

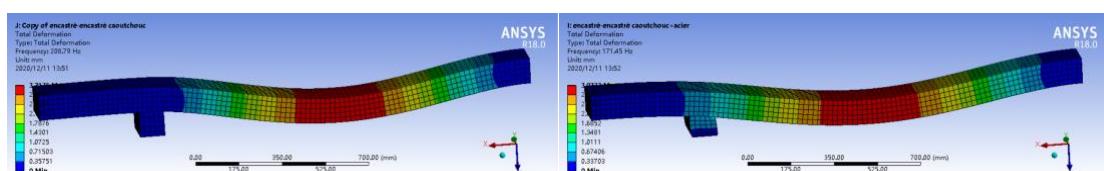


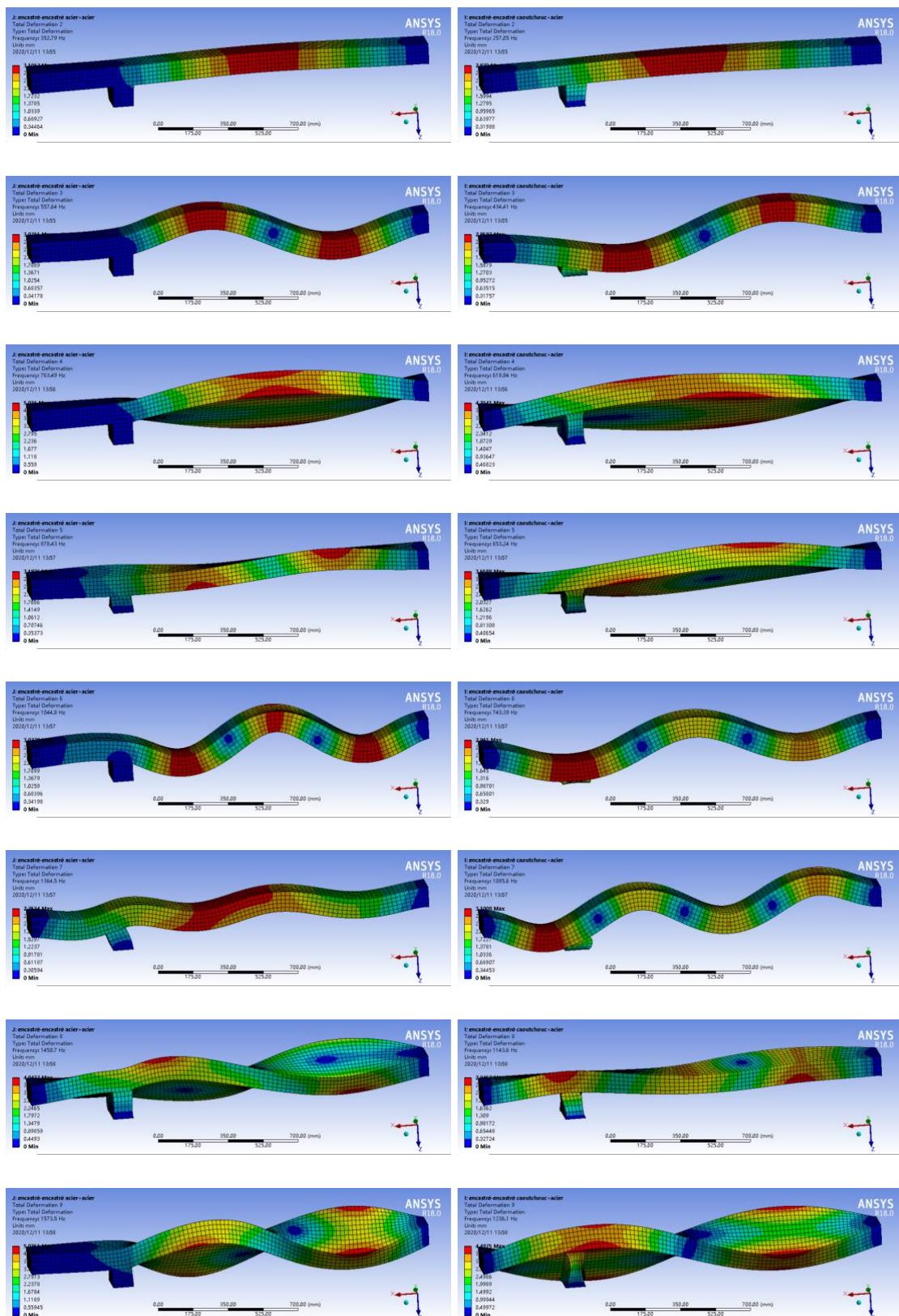
**Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre**

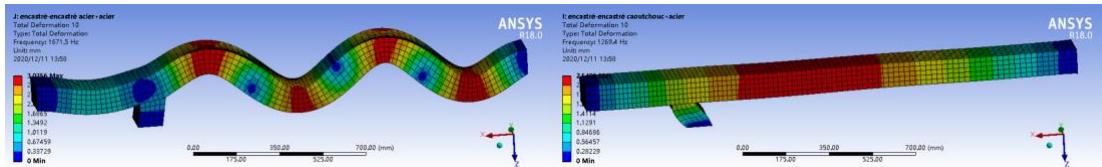


**Evolution de la fréquence propre en pourcentage en fonction du numéro du mode**

En comparant les 10 premiers résultats, nous pouvons voir que la déformation élastique de l'acier est nettement inférieure à celle du caoutchouc



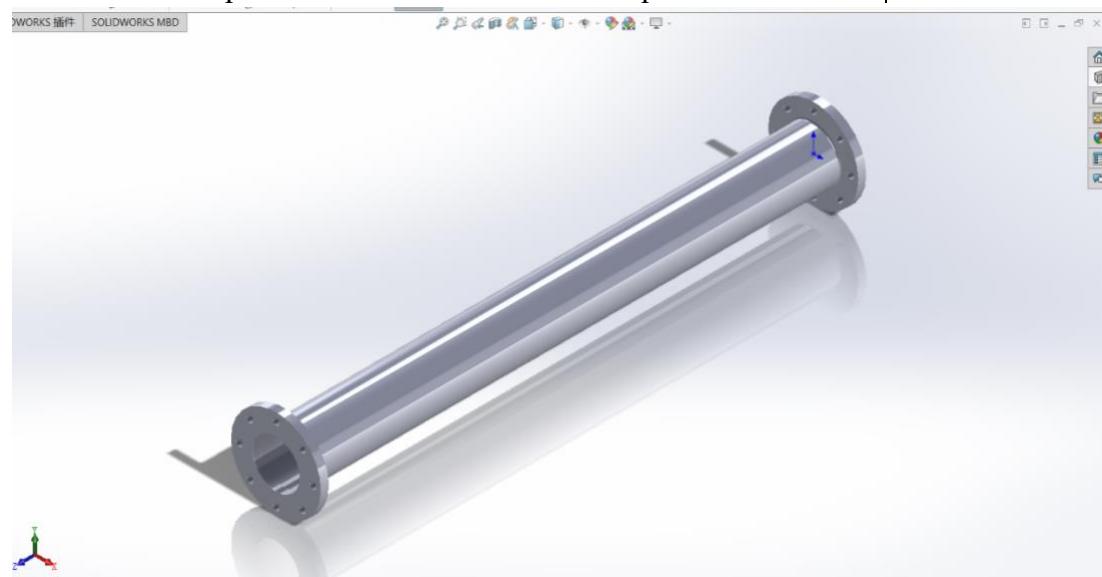




**Représentation des 20 premières déformées propres  
(Acier à gauche et caoutchouc à droite)**

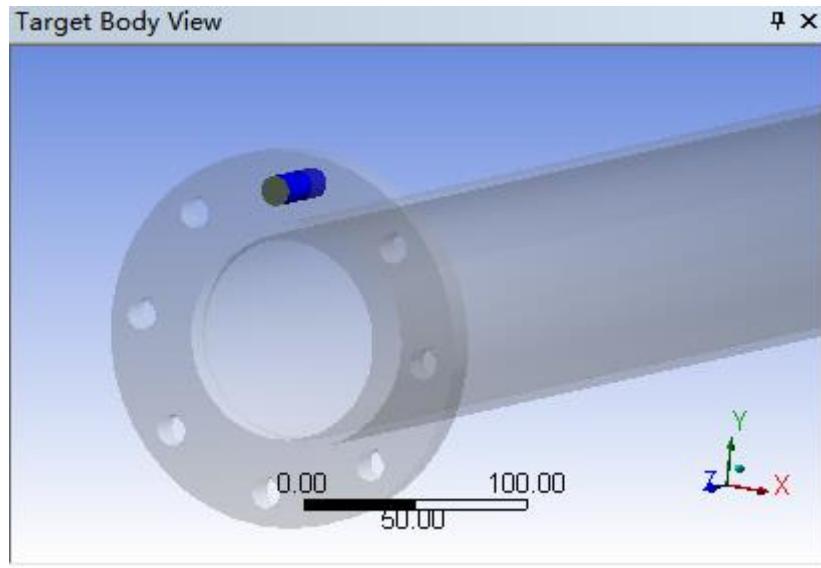
## 6 Etude du déboulonnage du tube

Nous avons récupéré la CAO d'un tube de la maquette de l'éolienne



**Présence d'un tube dans SolidWorks**

Lorsque deux tubes sont connectés, il n'y a pas de connexion entre les deux surfaces de contact. J'utilise de petits cylindres comme boulons dans ANSYS MECA, comme le montre la figure ci-dessous. Les boulons sont la seule méthode de connexion dans cette étude.

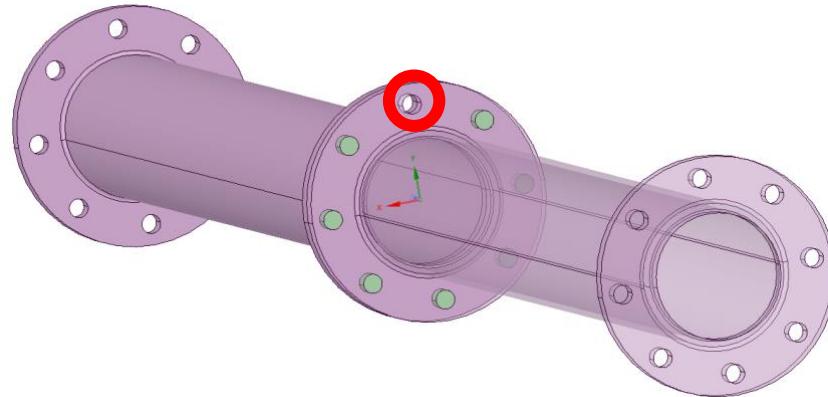


**Présence d'une liaison boulonnage**

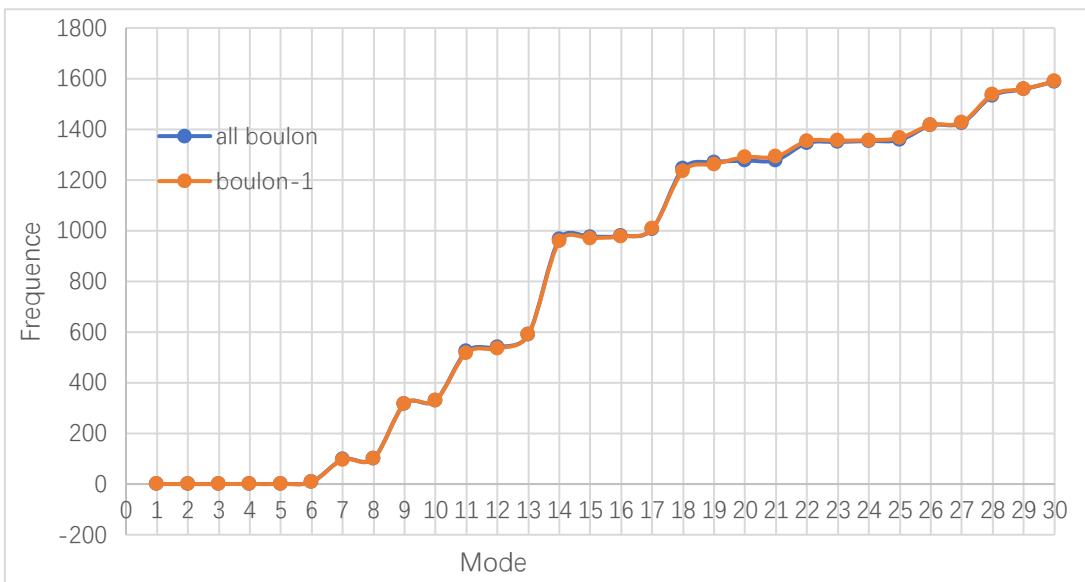
## 6.1 2 tubes assemblés libre-libre

### a. Un boulon enlevé

Lorsque deux tubes sont connectés, en raison de la symétrie. Il n'y a qu'une seule façon de retirer un boulon

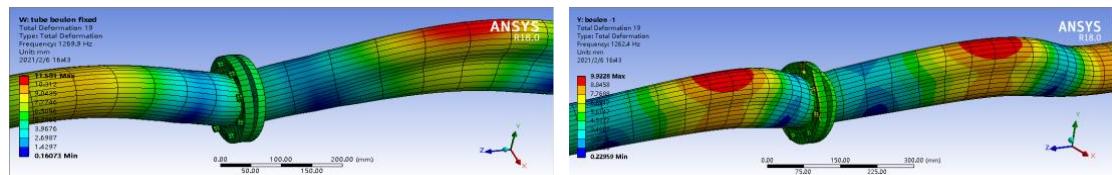


**Présence de 1 boulon enlevé**



### Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre

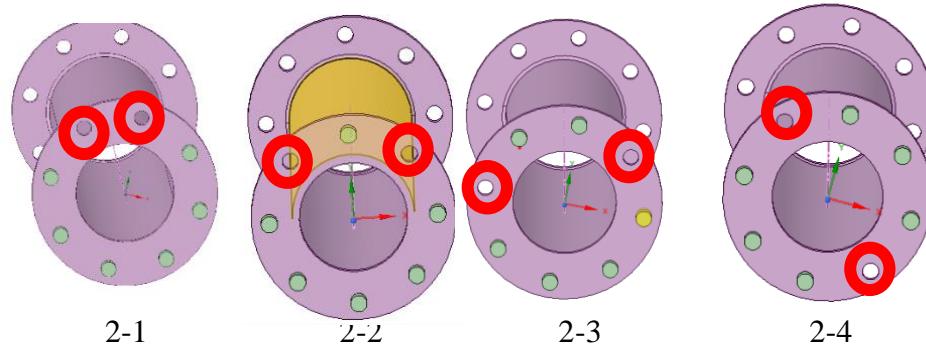
Lorsqu'un seul boulon tombe, il n'y a pratiquement pas de changement de fréquence



### Représentation de déformée propre (mode 19)

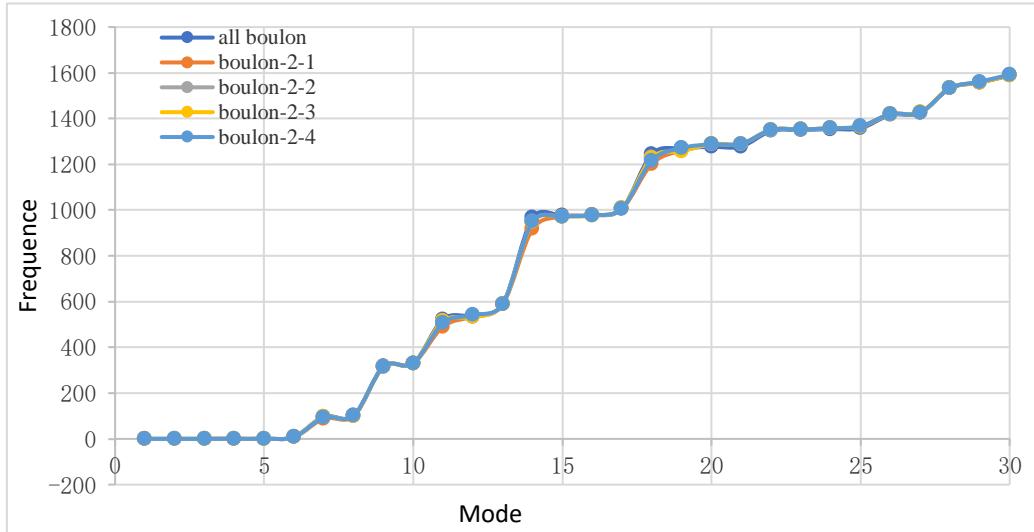
#### b. 2 boulons enlevés

Si deux boulons sont desserrés, il y a 4 situations différentes :

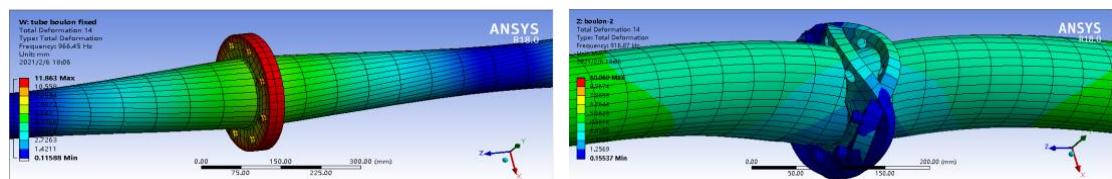


### Présence de 2 boulons enlevés

Par analogie, lorsqu'il y a 3, 4, 5, 6, 7 boulons desserrés, nous effectuons des simulations puis comparons les résultats. J'ai eu le résultat suivant :

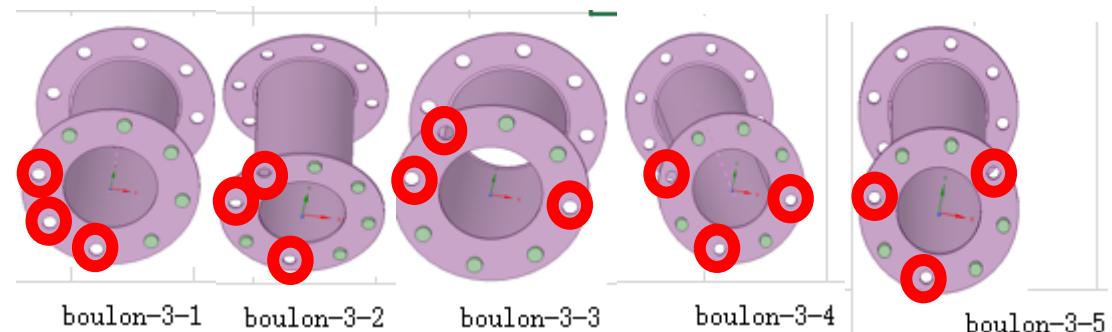


Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre

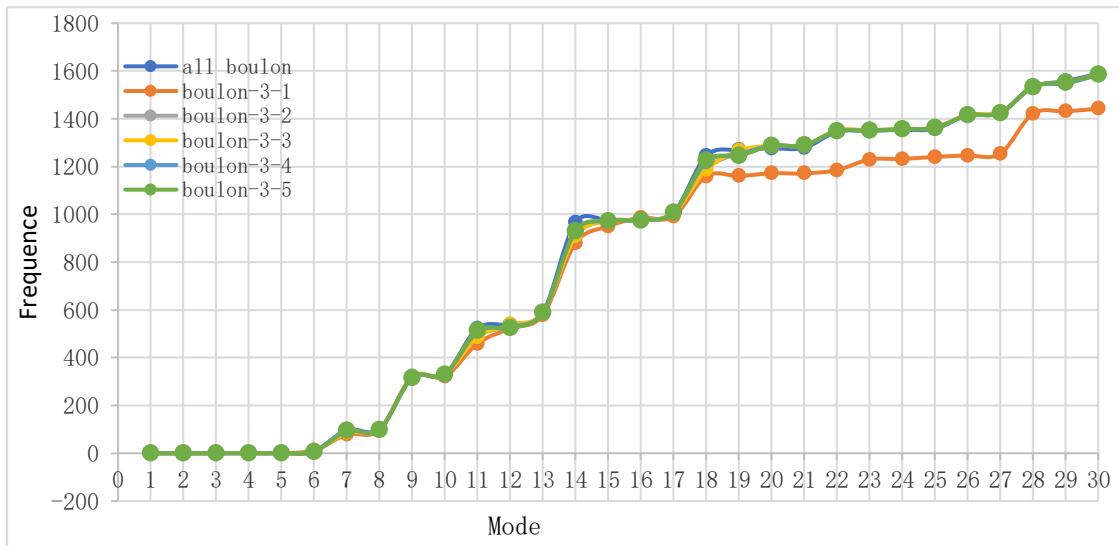


Représentation de déformée propre (mode 14)

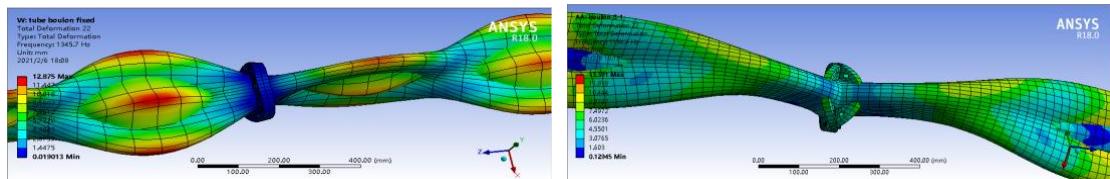
c. 3 boulons enlevé



Présence de 3 boulons enlevé

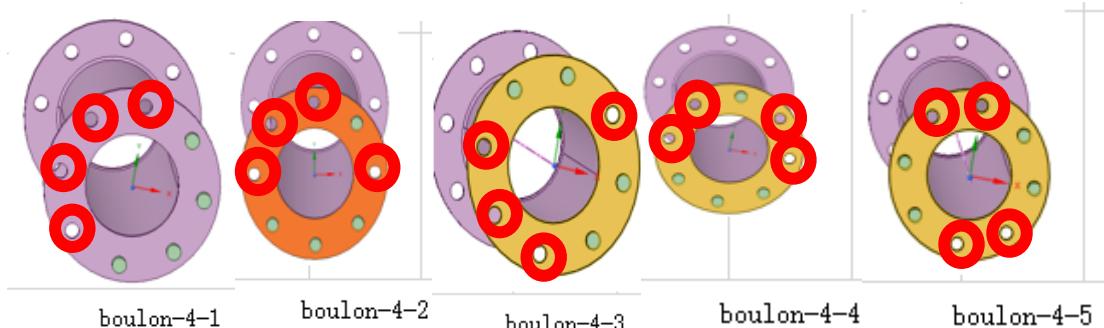


Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre

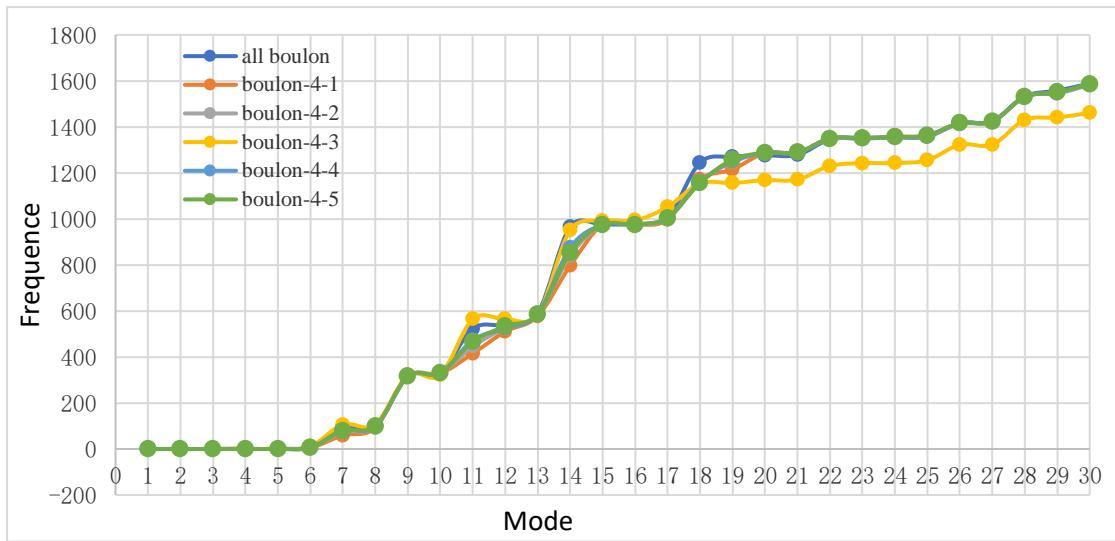


Représentation de déformée propre (mode 22)

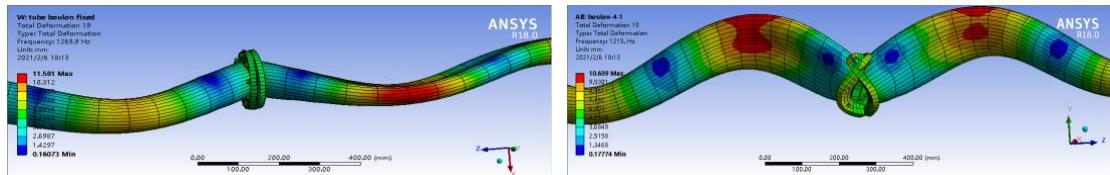
d. 4 boulons enlevés



Présence de 4 boulons enlevés

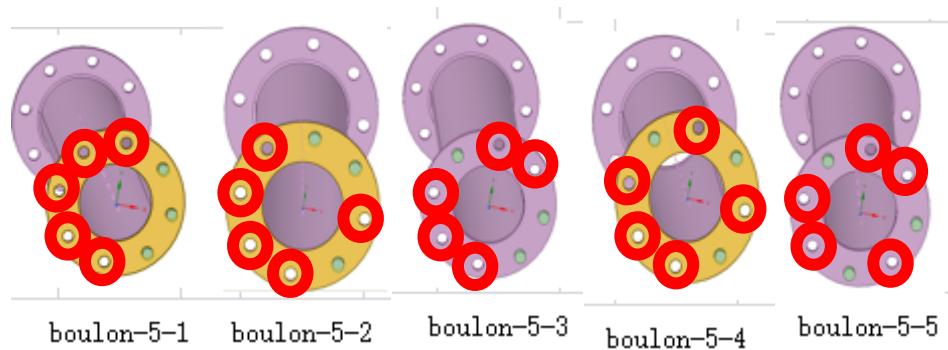


**Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre**

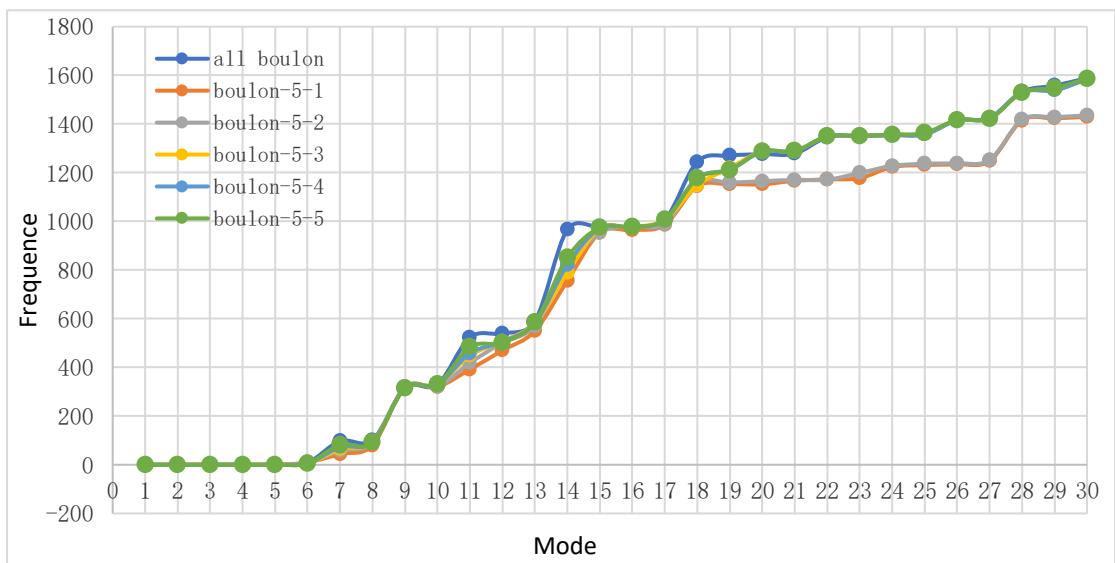


**Représentation de déformée propre (mode 19)**

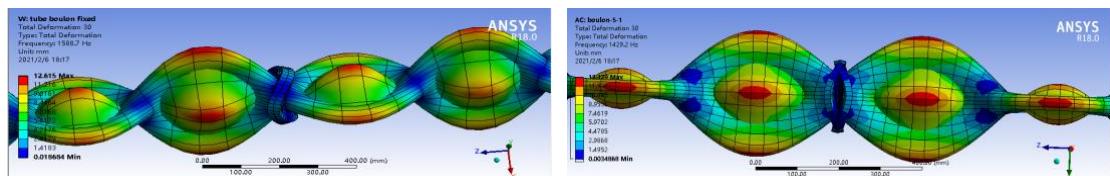
e. 5 boulons enlevés



**Présence de 5 boulons enlevés**

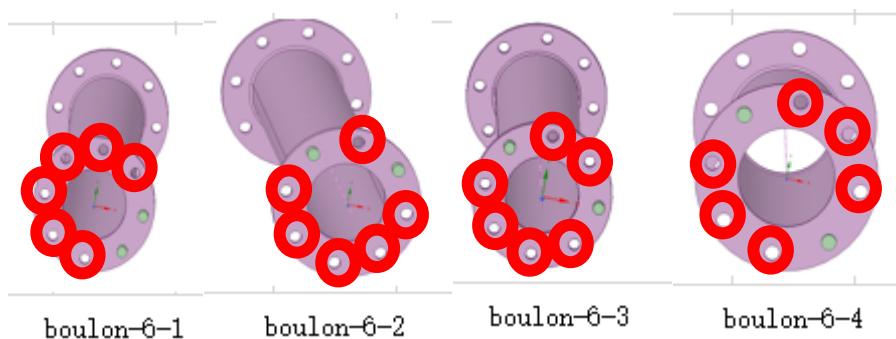


Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre

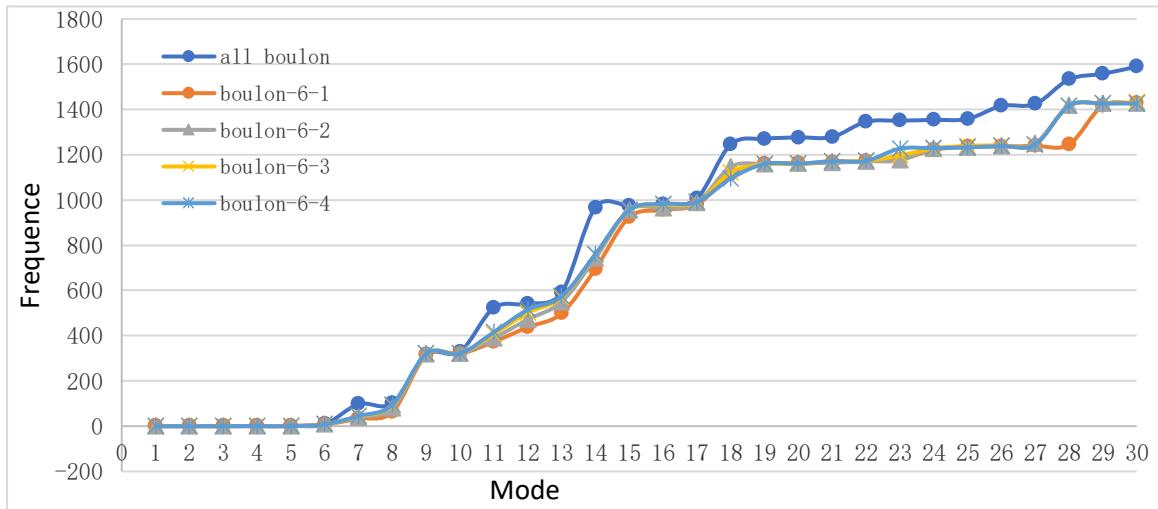


Représentation de déformée propre (mode 30)

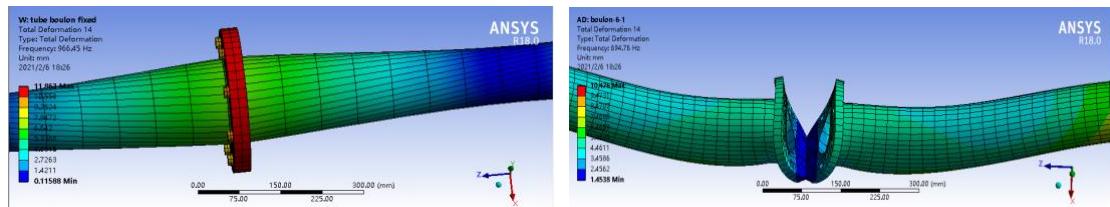
#### f. 6 boulons enlevés



Présence de 6 boulons enlevés

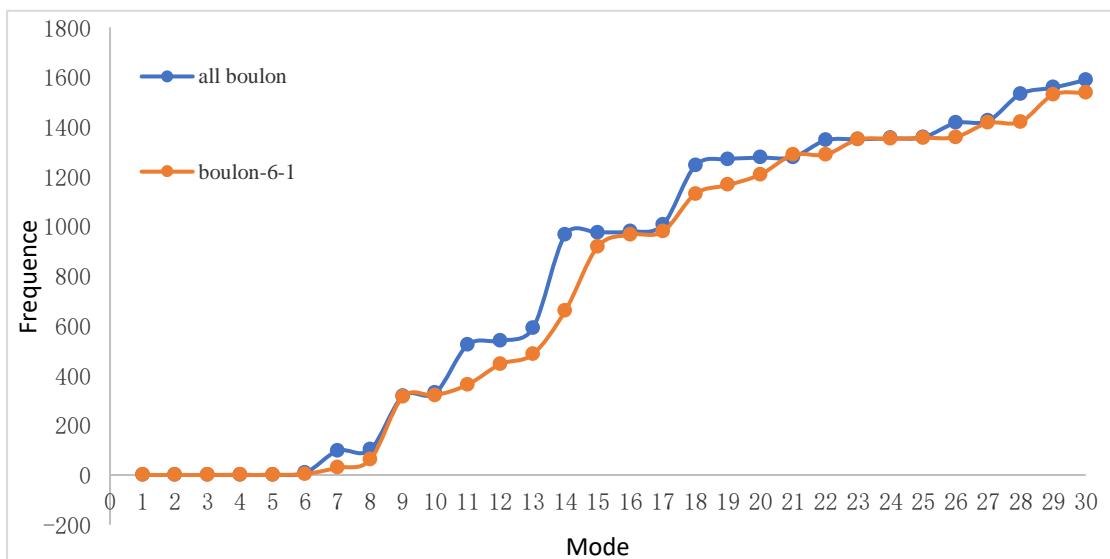


Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre



Représentation de déformée propre (mode 14)

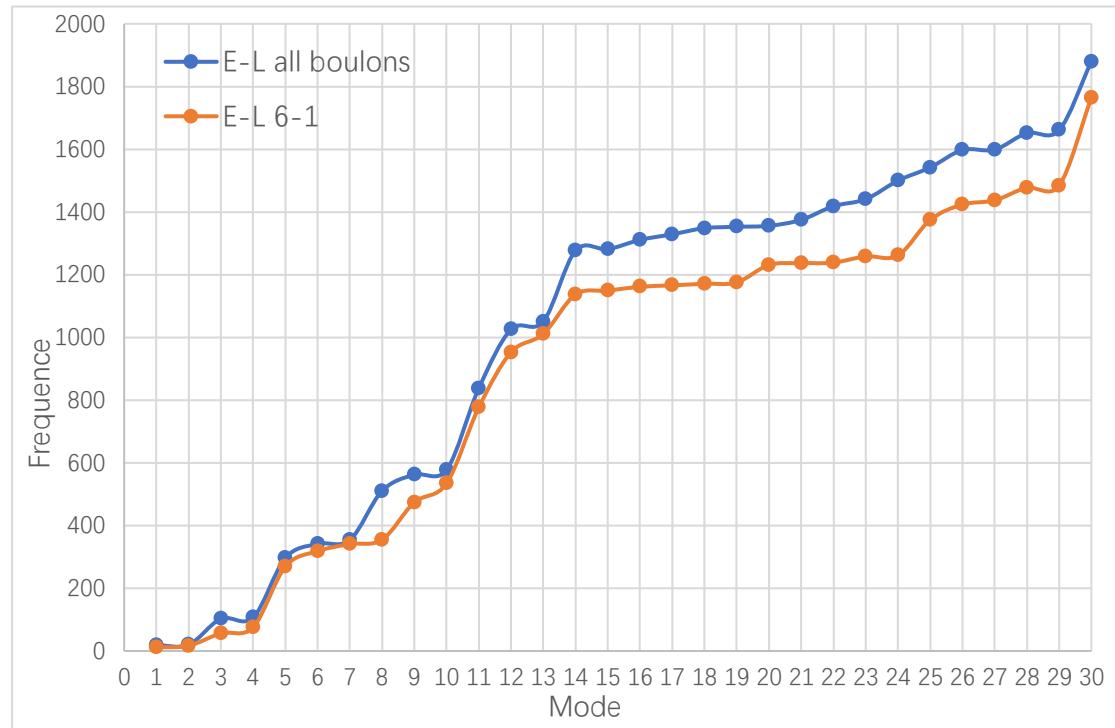
J'ai trouvé que le changement de fréquence n'est pas évident sur graphique. J'ai donc choisi une situation plus extrême. Six boulons adjacents tombent, ne laissant que deux boulons connectés à fixer (un total de huit boulons). Cela montrera clairement l'impact de déboulage.



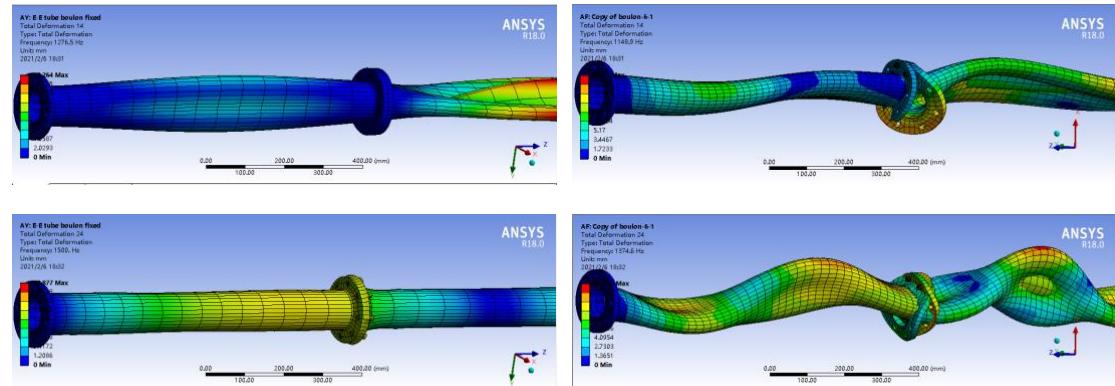
Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre

## 6.2 2 tubes assemblés encastré-libre

6 boulons ont été enlevés, mais les conditions aux limites du pipeline ont été modifiées en encastré-libre.

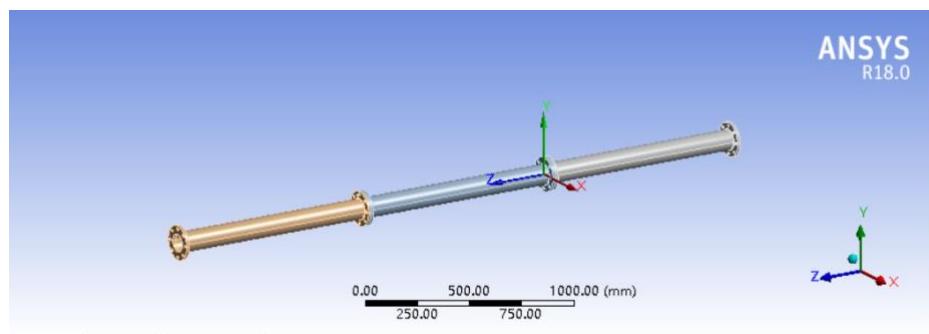


Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre



Représentation des déformées propres (mode 14, mode 24)

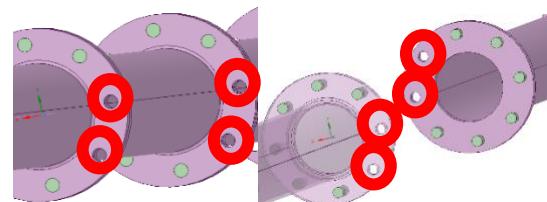
### 6.3 3 tubes Encastré -Libre



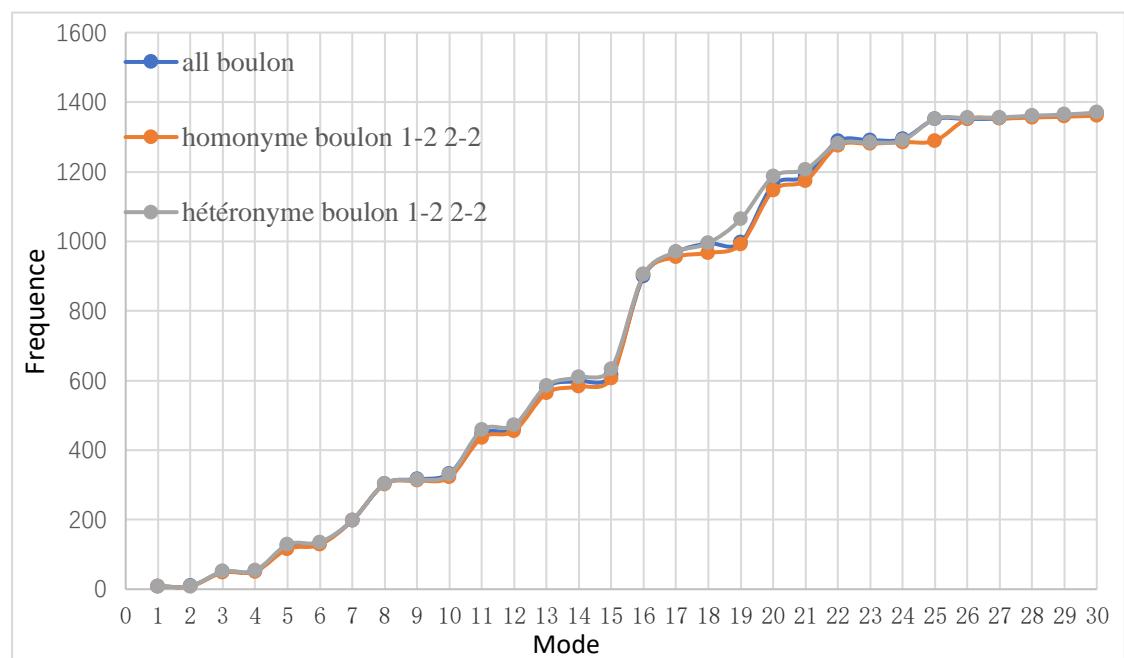
**Pressensé de l'assemblage de 3 tubes**

#### a. 2 boulons enlevés

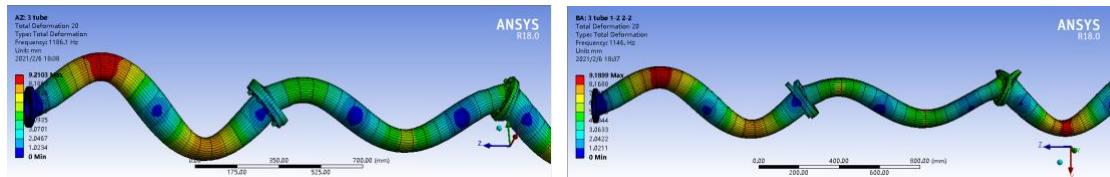
Cette situation est très proche de l'éolienne réelle. Avec l'expérience précédente, j'ai simulé une situation où plus de boulons sont tombés.



**Représentation de 2 boulons enlevés du même côté et du côté opposé**

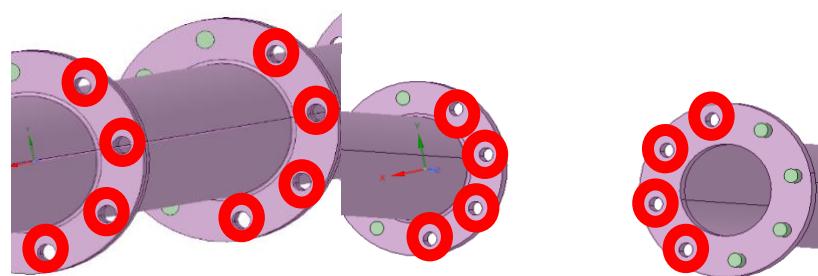


**Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre**

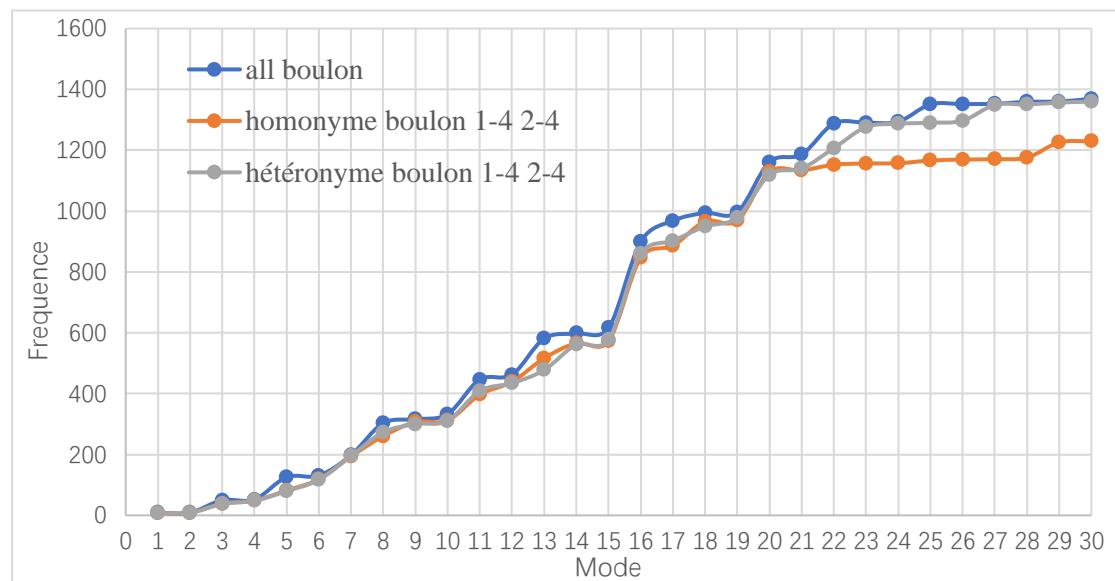


**Représentation de déformée propre (mode 20)**

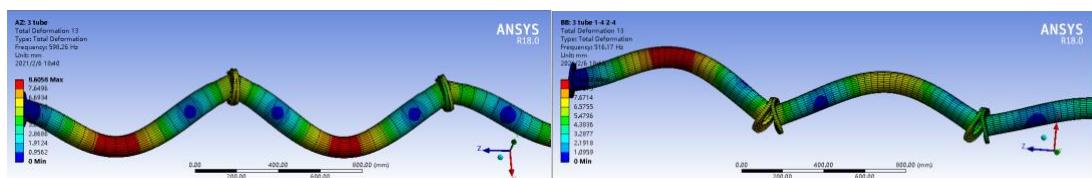
b. 4 boulons enlevés



**Représentation de 4 boulons enlevés du même côté et du côté opposé**

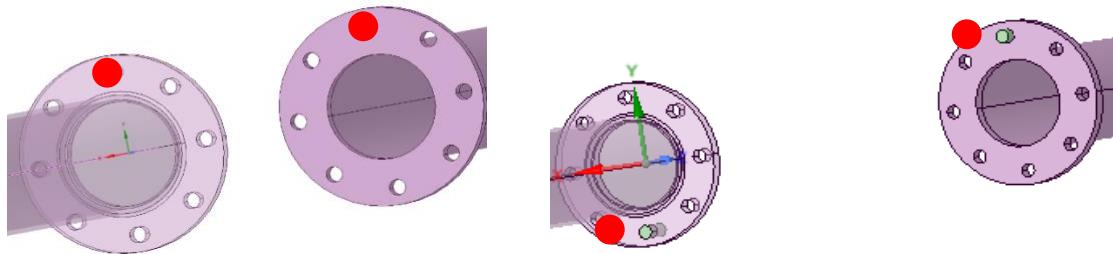


**Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre**

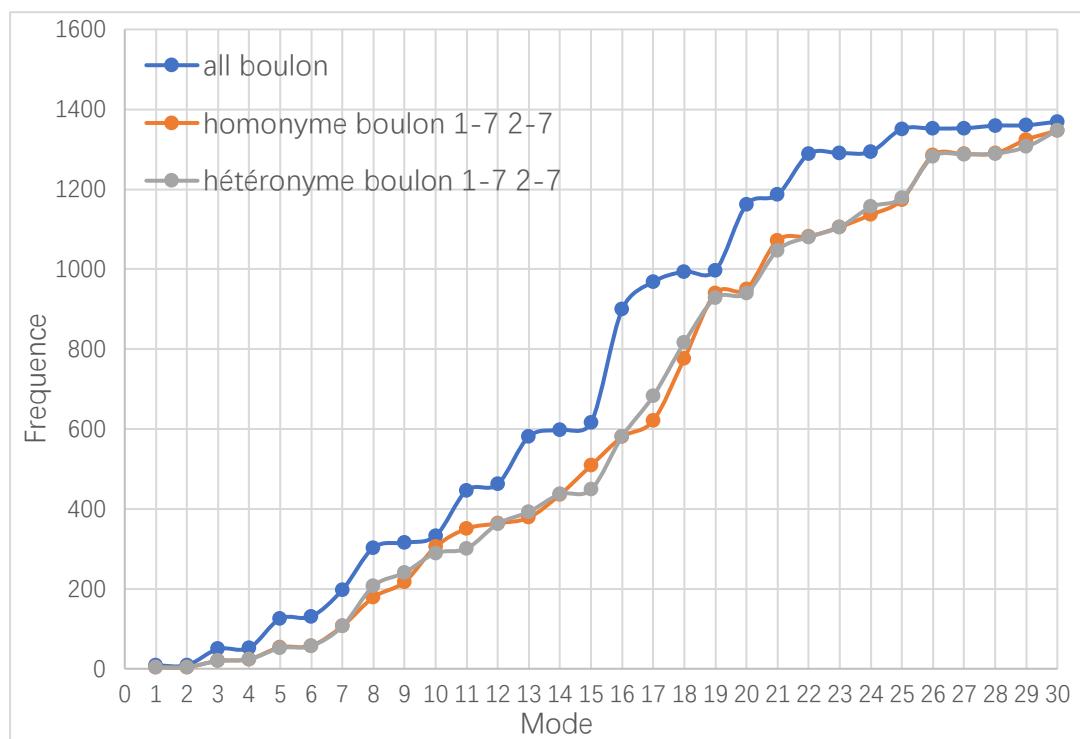


**Représentation de déformée propre(mode 13)**

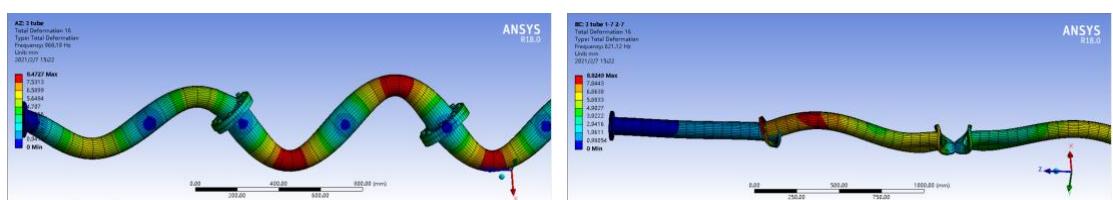
### c. 7 boulons enlevés



**Représentation de 7 boulons enlevés du même côté et du côté opposé**



**Fréquences propres fonction du numéro d'apparition du mode propre**



**Représentation de déformée propre(mode 16)**

## 7 Conclusion

Pour les poutres, la forme du défaut a un effet différent sur la fréquence propre de la poutre. La fissure a une grande influence sur la fréquence propre, et la profondeur de la fissure change la fréquence.

Au contraire, si le défaut est un trou, cela aura peu d'effet sur la fréquence de la poutre, et des trous plus profonds ne changeront pas significativement la fréquence propre.

Recherche sur le support sous la poutre : Le matériau du support modifie fortement la fréquence propre, ce qui est plus important pour les poutres à extrémités libres.

Pour les tubes : Ce n'est que lorsque 2 tubes sont connectés que le changement de fréquence propre peut être clairement vu lorsque 3 boulons tombent. Cela rend cette méthode de détection difficile à réaliser, car dans ce cas, la structure globale a déjà eu des problèmes majeurs, mais ce changement de fréquence propre n'est pas assez évident, et qu'il peut également être causé par le vent ou d'autres forces extérieures.

## 8 Bibliography

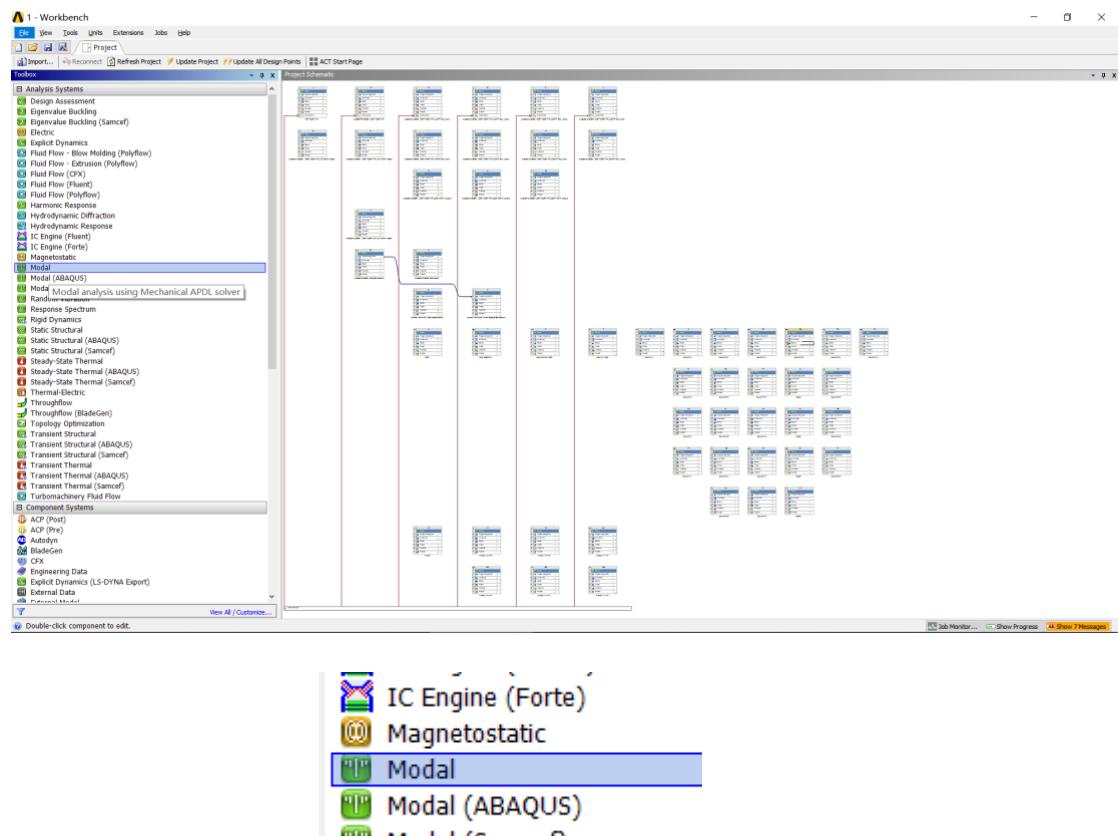
Bernard Laulagnet . Cours vibrations de département GMC et élément fini

Lionel GENDRE. Quelques types d'éléments finis. [En ligne] disponible sur <<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/8128/8128-quelques-types-delements-fnis-ensps.pdf>>

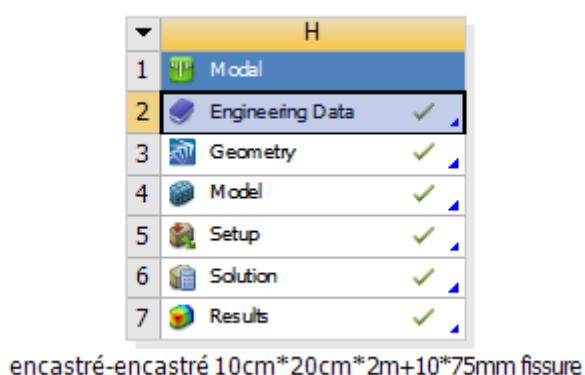
## 9 Annexe

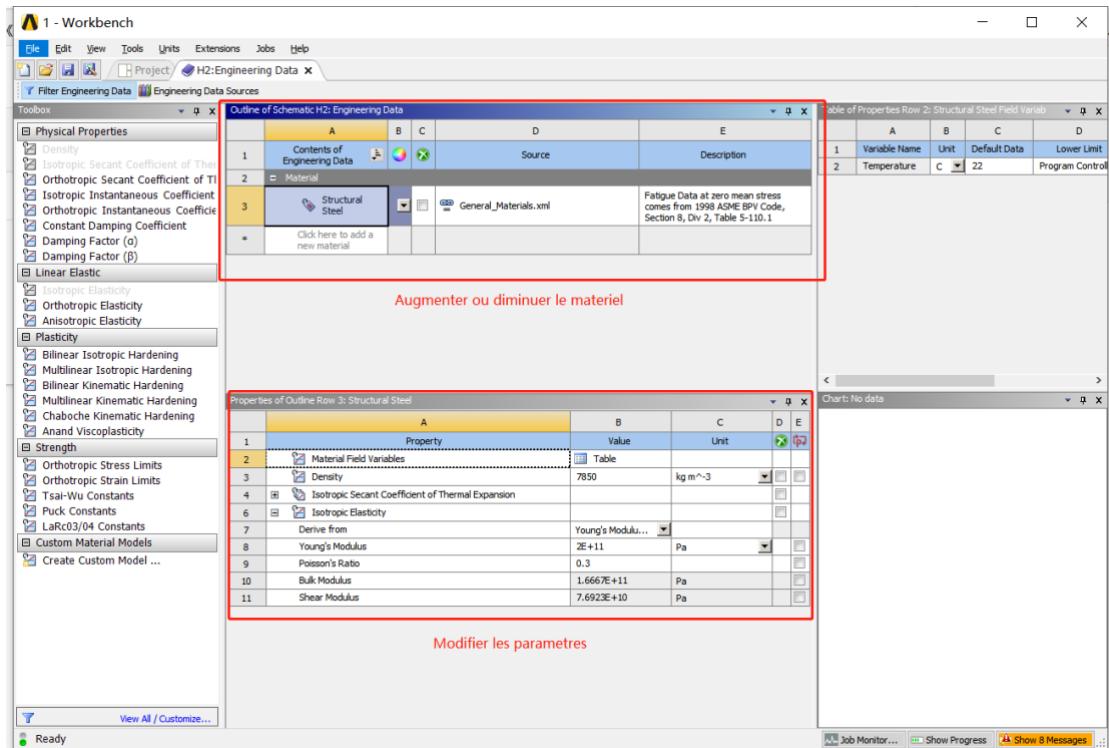
Utiliser ANSYS pour l'analyse des fréquences propres

## Étape 1 : créer un nouveau module modal

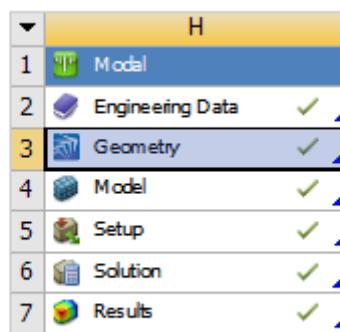


## Étape 2 : Définir les données de matériau



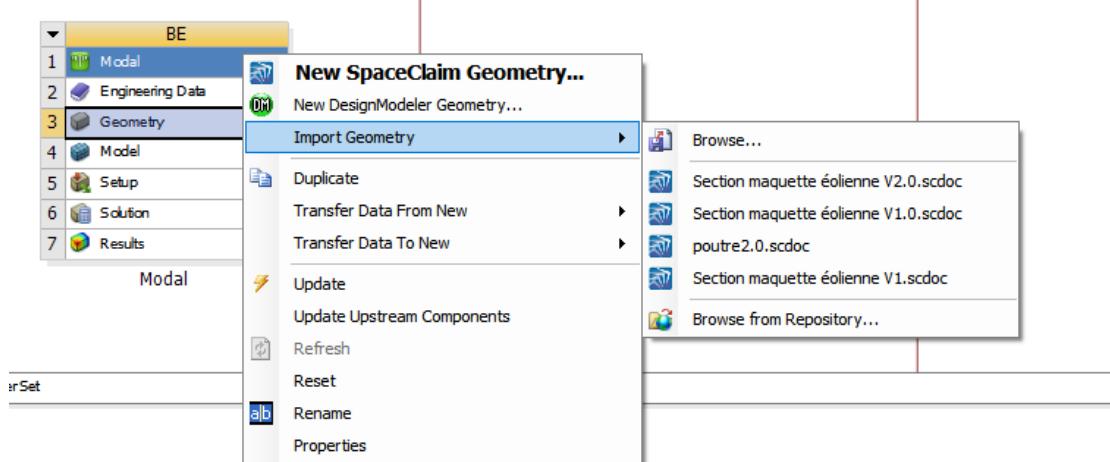


### Étape 3 : Construire le modèle géométrique à analyser

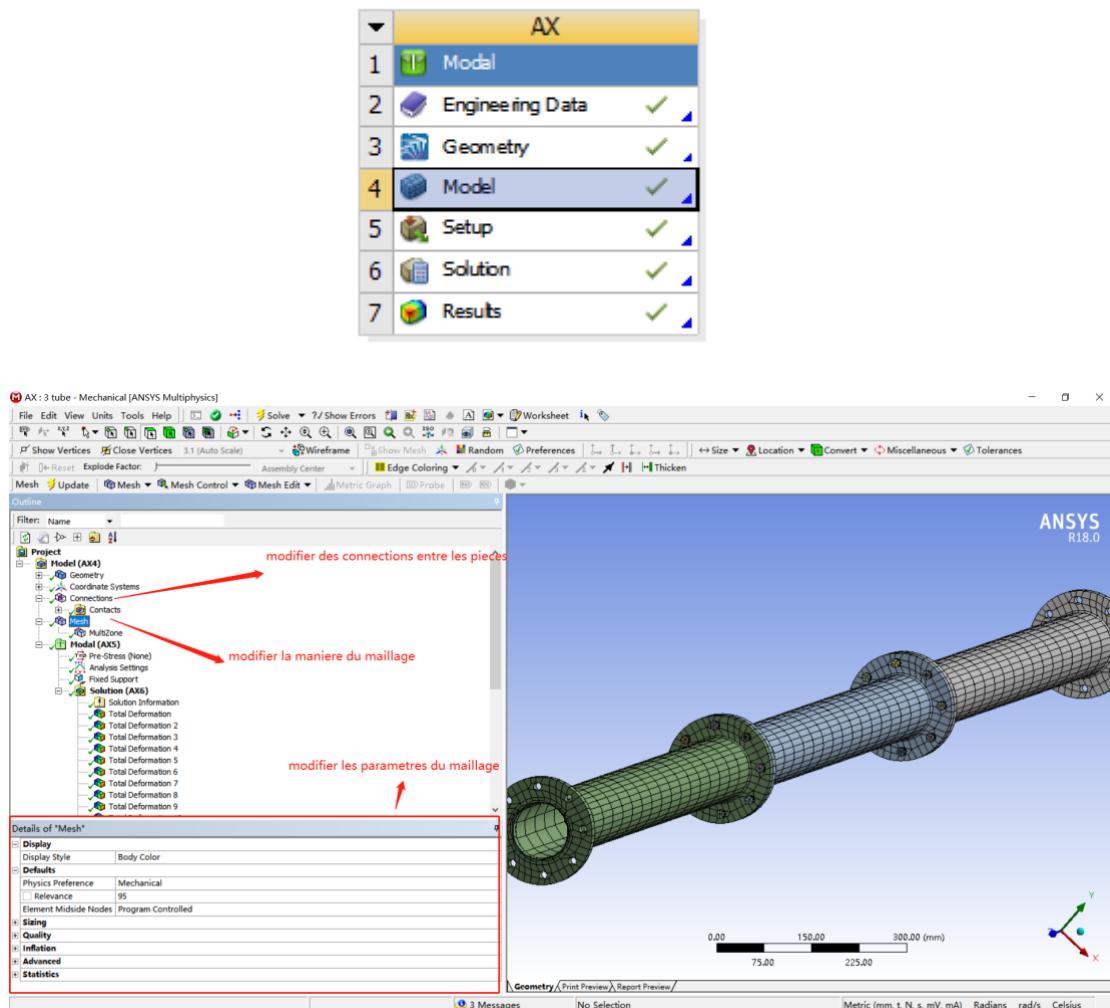


encastré-encastré 10cm\*20cm\*2m+10\*75mm fissure

Vous pouvez importer directement des fichiers .step  
complétés dans SolidWorks



## Étape 4 : Dessiner un maillage



## Étape 5 : Résoudre

