

# Modélisation du Golden Gate Bridge dans Code Aster

Jean-Louis DU, Guenole Cocou ODAH

January 4, 2025

## Abstract

L'idée de ce projet est dans un premier temps de représenter le Golden Gate Bridge sur **Salome Meca** en simplifiant sa géométrie. Ensuite, on va essayer de créer un maillage adapté à cette géométrie. Puis après avoir créé des groupes sur notre maillage de pont simplifié, on va essayer de lui appliquer plusieurs chargements à l'aide du module **AsterStudy** et voir si le modèle créé correspond bien à la réalité et dans quelle mesure.



Figure 1: Golden Gate Bridge (Par © Frank Schulenburg)

# Sommaire

<b>1 Géométrie</b>	<b>3</b>
1.1 Présentation générale et hypothèse . . . . .	3
1.2 Éléments 1D . . . . .	3
1.3 Éléments 3D . . . . .	4
<b>2 Maillage</b>	<b>5</b>
2.1 Partition du Pont . . . . .	5
2.2 Choix du maillage . . . . .	5
2.3 Création des groupes . . . . .	6
<b>3 Calculs</b>	<b>7</b>
3.1 Matériaux, conditions limites, chargements . . . . .	7
3.2 Étude de cas . . . . .	8
3.2.1 Cas 1 : Précontrainte + Poids . . . . .	8
3.2.2 Cas 2 : Précontrainte + Poids + Trafic . . . . .	9
3.2.3 Cas 3 : Précontrainte + Poids + Trafic + Vent . . . . .	10
3.3 Résolution et post-traitement . . . . .	11
3.3.1 Déplacements . . . . .	11
3.3.2 Contraintes . . . . .	11
3.4 Tentative de simulation de séisme . . . . .	11
<b>4 Discussion des résultats</b>	<b>12</b>

# 1 Géométrie

## 1.1 Présentation générale et hypothèse

Le Golden Gate Bridge, aussi appelé Pont de San Francisco, est un édifice permettant la traversée du détroit du Golden Gate qui relie la baie de San Francisco et l'Océan Pacifique. Le pont est constitué de deux tours principales permettant de soutenir la structure suspendue de 1280 m.

La première étape de ce projet consiste à faire la géométrie du pont. Le pont étant un objet relativement compliqué, on a choisi de simplifier sa géométrie. On a choisi de modéliser les câbles en 1D (car la dimension des câbles est très petite comparée au reste des éléments du pont, on leur rajoutera tout de même une épaisseur dans les calculs) et la route et les tours en 3D.

On a choisi de prendre pour origine le milieu du pont de sorte à pouvoir utiliser les symétries, et on a aussi choisi de placer  $z = 0$  à la hauteur de la route.

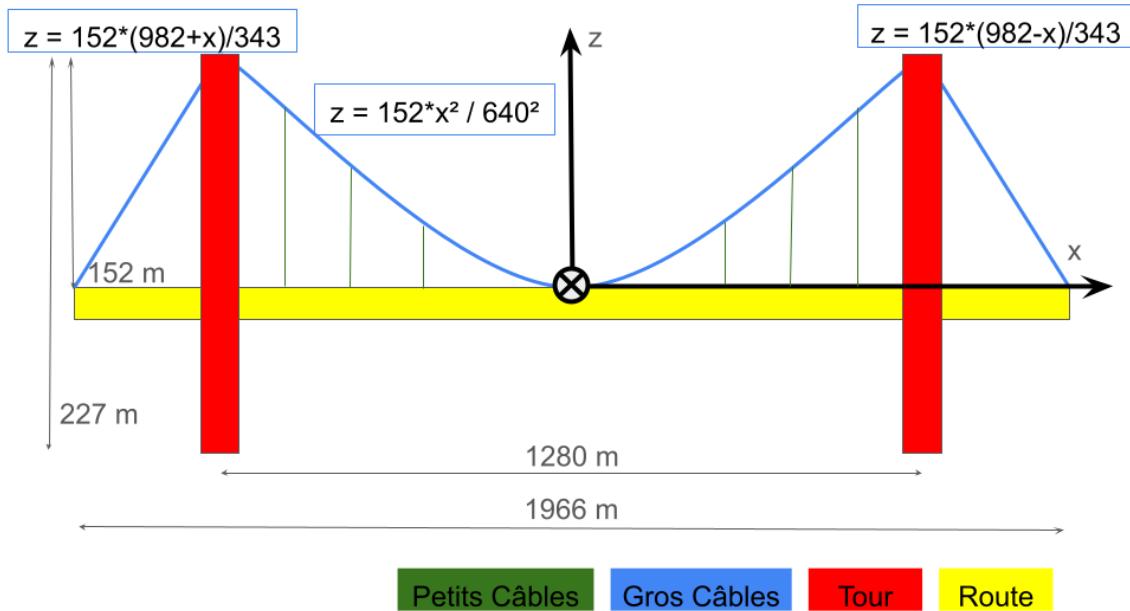


Figure 2: Géométrie considérée et quelques longueurs principales

## 1.2 Éléments 1D

Parmi les câbles, on trouve les câbles principaux qui vont d'une tour à l'autre. Ces câbles décrivent une parabole d'expression  $z = \frac{152x^2}{640^2}$  pour  $x \in [-631.1, 631.1]$  à  $y = -13.5$  et  $y = 13.5$ .

De plus, on retrouve des câbles droits reliant les tours à la partie reliée au sol de la route de part et d'autre du pont. Ces câbles-là ont pour expressions mathématiques  $z = \frac{152}{343}(983 - x)$  pour ceux sur la droite du pont et  $z = \frac{152}{343}(983 + x)$  pour ceux sur la gauche du pont.

Enfin sur ces "gros" câbles se trouvent d'autres câbles verticaux moins épais qui relient les "gros" câbles au pont.

Pour créer cela dans le module géométrie de **Salome Meca**, on a commencé par utiliser l'option créer un edge à partir d'une expression explicite. On s'est ensuite rendu compte qu'en faisant cela, on n'avait pas de contrôle sur comment était créé cet élément (les lignes créées sont en fait une chaînes de petites lignes avec un écart fixe).

Alors pour faire face à ce problème, on a utilisé le script Python, en faisant une boucle for et en utilisant les fonctions de code aster, on arrive très aisément à créer un câble comme successions de petits segments qu'on contrôle parfaitement, on les a fait de sorte à ce que les segments des gros câbles partagent un noeud avec les câbles verticaux.

D'après les données qu'on a récoltées, le pont admet des câbles verticaux tous les 15 mètres. On les a donc espacés de cette manière par la même idée que précédemment, en pensant à enlever ceux qui se trouvaient au niveau des tours.

### 1.3 Éléments 3D

Concernant les parties 3D (les tours et la route), qu'on va appeler blocs, on a simplifié la géométrie de sorte à tout représenter comme une fusion de pavés droits de tailles variables.

On a eu la chance d'avoir accès à une ressource contenant beaucoup d'informations sur les dimensions et spécificités techniques du Golden Gate Bridge (<https://www.goldengate.org/bridge/history-research/statistics-data/design-construction-stats/>).

Pour les données manquantes, on s'est basé sur des images trouvées sur internet pour en déduire un ordre de grandeur plus ou moins précis. On a notamment estimé l'épaisseur de la route et les hauteurs des barres verticales qui composent les tours. Voici un schéma avec toutes les longueurs utilisées :

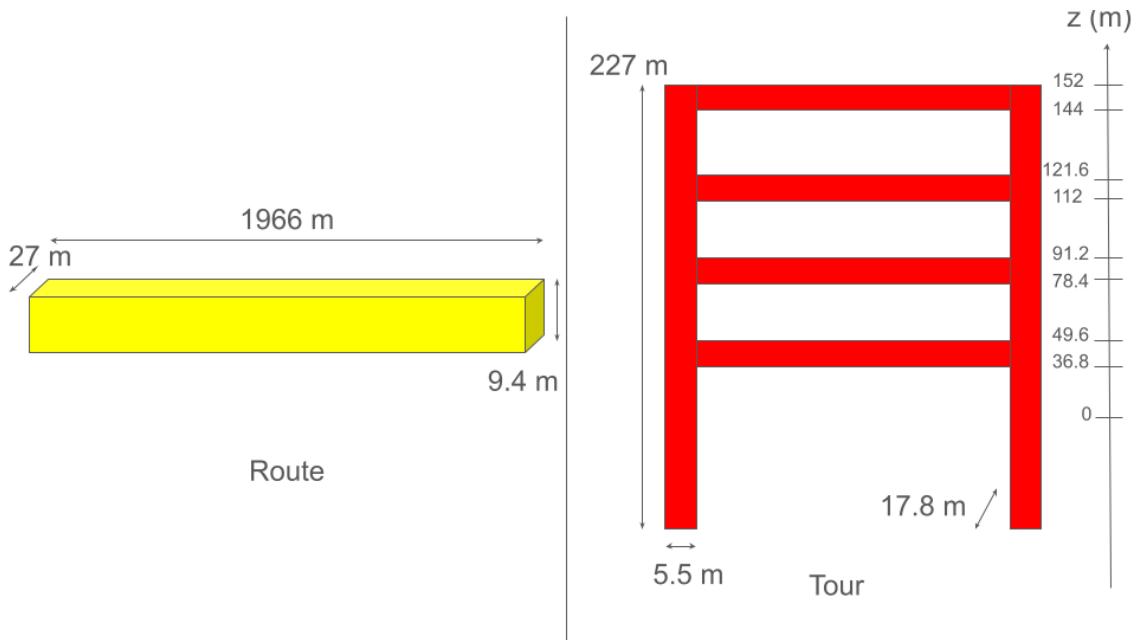


Figure 3: Dimensions de la route et des tours

Pour commencer, on a utilisé les options de **Salome Meca** permettant de construire des pavés en choisissant leur taille. Ensuite pour les placer aux bons endroits, on a joué avec les outils de translation et de symétrie. Pour pouvoir modifier les dimensions plus facilement, on s'est appuyé sur le script Python.

On obtient au final cette figure.

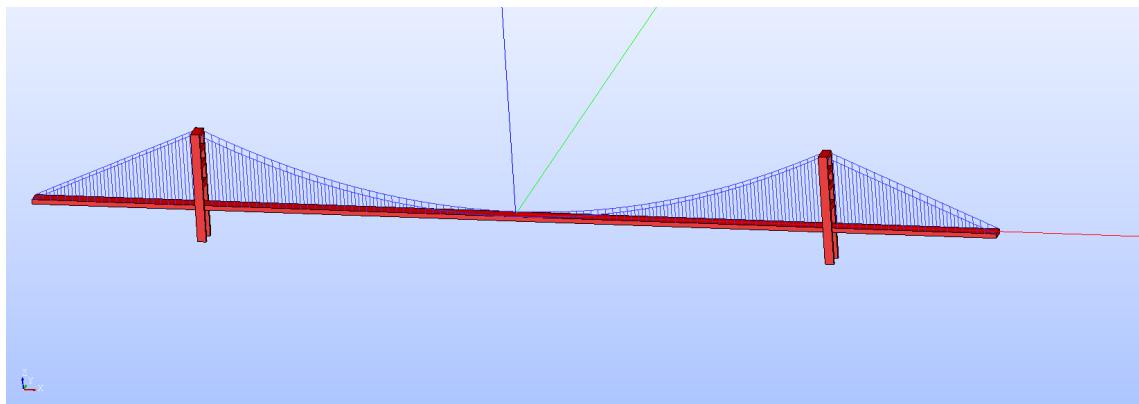


Figure 4: Géométrie obtenue

## 2 Maillage

Après avoir créé la géométrie du pont, on s'est attaqué au maillage de celui-ci. Puisque notre géométrie est composée d'éléments 1D et 3D, on ne peut pas les mailler ensemble. L'idée est alors de générer un maillage pour les câbles et un autre pour les blocs qu'on va ensuite fusionner à l'aide de l'outil "compound mesh".

### 2.1 Partition du Pont

Pour que la fusion des deux maillages se fasse correctement, il faut que les noeuds des deux maillages correspondent, c'est pour cela qu'on a dû repartir dans la géométrie pour partitionner les blocs correctement. Le partitionnement a aussi pour but de permettre un meilleure maillage de la structure 3D. Pour cela, on s'est encore une fois servi du script Python pour nous permettre de gérer les plans de coupes plus aisément.

En effet, il a fallu partitionner selon le plan orthogonal à x pour faire correspondre les noeuds des cordes verticales et les noeuds de la route. Il a aussi fallu partitionner selon le plan orthogonal à y pour gérer la fusion de la route et des tours, et le plan orthogonal à z pour les différents étages des tours.

Après toute ces opérations, on obtient la partition suivante.

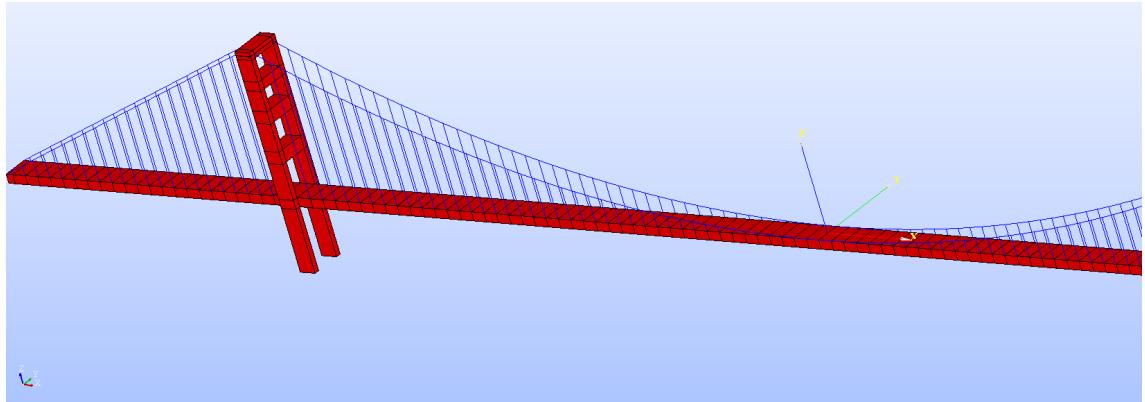


Figure 5: Partitionnement du pont

### 2.2 Choix du maillage

La partie 3D étant composée de pavés, on a choisi d'utiliser un maillage hexaédrique (qui est parfaitement adapté aux objets polygonaux et qui marche mieux que le maillage triangulaire). On a fait attention à réaliser des sous-maillages au sommet des tours et sur la route près des tours (car on y trouve des éléments relativement petits qu'on aimeraient ne pas mailler trop finement). Pour le reste, on a choisi de mailler chaque élément de la partition en 3 éléments par direction.

Lors des calculs modaux qu'on va réaliser plus tard, on verra que le maillage n'est peut-être pas assez fin.

Pour la partie 1D, on a choisi de discréteriser les câbles verticaux en 3 éléments, alors qu'on a choisi de laisser les autres sans les découper plus.

Enfin, on fusionne les deux maillages. Ce qui nous donne ceci.

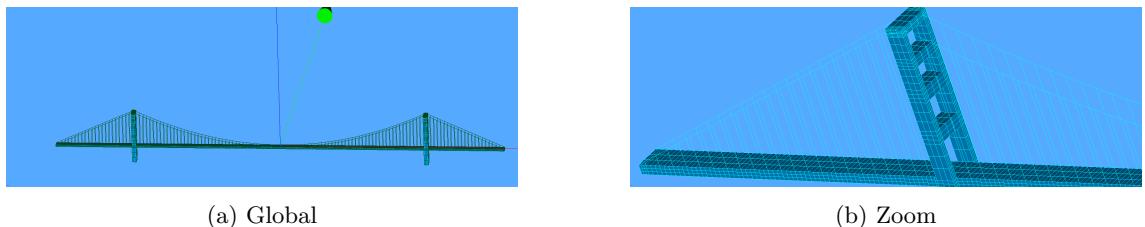


Figure 6: Mesh hexaédrique du pont

## 2.3 Création des groupes

On a créé les groupes suivants dans notre maillage :

- **Groupes de Noeuds :**

- block\_rot : pour bloquer la rotation de plusieurs noeuds dans toutes les directions.

- **Groupes de Cotés :**

- Gros\_cables : notamment pour leur affecter une épaisseur
- Petits\_cables : notamment pour leur affecter une autre épaisseur plus petite

- **Groupes de Faces :**

- Pont\_d : pour exercer la force surfacique simulant le vent sur la face droite du pont ( $y = -13.5$ )
- Pont\_g : pour exercer la force surfacique simulant le vent sur la face gauche du pont ( $y = 13.5$ )
- Tour\_d : pour exercer la force surfacique simulant le vent sur la face droite du pont ( $y = -13.5$ )
- Tour\_g : pour exercer la force surfacique simulant le vent sur la face gauche du pont ( $y = 13.5$ )
- Pieds : pour encastrer les pieds du ponts ou pour lui imposés les déplacements liés au séismes
- Debut : pour encastrer le début du pont ( $x = -983$ )
- Fin : pour encastrer la fin du pont ( $x = 983$ )
- Route : pour exercer la force surfacique simulant le poids des voitures et des piétons

- **Groupes de Volumes :**

- Bloc : composé des tours et de la route

Pour le faire dans **AsterStudy** on s'est majoritairement basé sur l'option de création de groupes à l'aide de filtres. Cette option de filtres permet de créer ses groupes sans qu'ils soient au préalable créés dans la géométrie. Les filtres nous permettent de créer des groupes en se basant sur l'intersection et l'union de géométrie déjà existantes autre que celui sur lequel se base le maillage. Par exemple, le groupe Pont\_d est créé comme l'intersection de la route, de la structure entière, du plan  $y = -13.5$  et de l'option FreeFaces qui donne les faces de surface libre. Mais pour les noeuds, on a choisi de les sélectionner à la main.

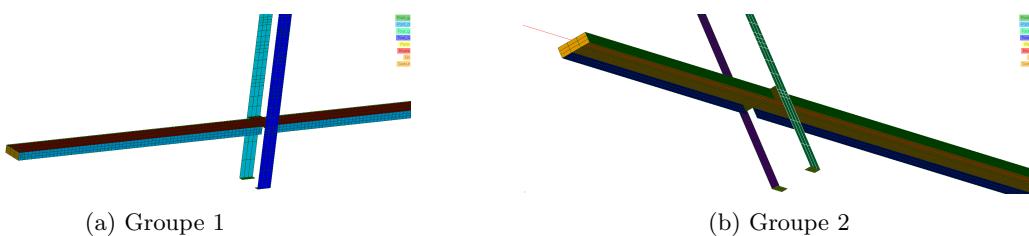


Figure 7: Groupes surfaciques du maillage

On a donc créé tous ces groupes en prévoyant les études qu'on allait réaliser dans **AsterStudy**. Même en les prévoyant en avance, on a dû y revenir après avoir observé des comportements étranges ou après s'être rendu compte qu'il nous en manquait. C'est donc après plusieurs va-et-vient entre le module Mesh et **AsterStudy** qu'on est parvenu à cette liste de groupes (qui est encore loin d'être exhaustive pour une étude complète mais qui sera suffisante pour les simulations plus basiques que l'on a choisi de réaliser).

Avec le maillage et ses groupes de prêt, on peut donc se lancer dans le module **AsterStudy** pour réaliser les calculs statiques et dynamiques.

### 3 Calculs

Après avoir réalisé la géométrie et le maillage du pont, nous avons utilisé le module **AsterStudy** de **Salome Meca** pour effectuer les calculs de chargement et d'analyse structurelle. L'objectif est de vérifier si le modèle créé représente correctement le comportement mécanique du Golden Gate Bridge d'une part et d'évaluer ses performances sous différents scénarios de chargement allant de la gravité au déplacement sous l'effet d'un séisme.

#### 3.1 Matériaux, conditions limites, chargements

Avant de commencer les calculs, on a dû choisir des matériaux pour composer le pont et on a aussi formuler plusieurs hypothèses pour simplifier les charges appliquées à notre pont :

- **Matériaux :**

- Les câbles sont supposés être en acier, avec des propriétés homogènes et isotropes. Les valeurs utilisées sont :
  - \* Module de Young  $E_{\text{acier}} = 200 \text{ GPa}$
  - \* Coefficient de Poisson  $\nu_{\text{acier}} = 0.27$
  - \* Densité  $\rho_{\text{acier}} = 7860 \text{ kg/m}^3$
- Les éléments du bloc (route, tours) sont supposés être en béton, avec des propriétés homogènes et isotropes. Les valeurs utilisées sont :
  - \* Module de Young  $E_{\text{béton}} = 35 \text{ GPa}$  ;
  - \* Coefficient de Poisson  $\nu_{\text{béton}} = 0.2$  ;
  - \* Densité  $\rho_{\text{béton}} = 2400 \text{ kg/m}^3$ .

- **Précontrainte des câbles :** Une précontrainte a été simulée dans les câbles principaux par l'application d'une variation de température  $\Delta T$ . La variation a été définie de manière à provoquer une tension initiale dans les câbles, simulant l'état tendu réel du pont. La relation reliant la différence de température est la suivante :

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

où :

- $\sigma = 200 \text{ MN}$  est la contrainte induite,
- $E = 200 \text{ GPa}$  est le module de Young de l'acier,
- $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  est le coefficient de dilatation thermique de l'acier,
- $\Delta T$  est la variation de température appliquée à déterminer.

En utilisant les valeurs numériques ci-dessus, on obtient  $\Delta T = 115$

- **Chargements :**

- **Gravité** : Comme tout élément, le pont est soumis à la gravité.
- **Poids du trafic** : On a modélisé les charges dues à la circulation des véhicules sous forme de charges uniformément réparties sur la surface de la route. La valeur approximative utilisée est de  $5.5 \text{ kN/m}^2$ .
- **Vent** : Une charge due au vent est appliquée perpendiculairement à la route, avec une pression uniforme de  $627 \text{ N/m}^2$ . Cette charge est appliquée sur les parties latérales des tours et de la route. On a considéré la surface des câbles négligeable pour que l'effet du vent sur celle-ci soit visible.

Concernant la valeur trouvée, on a utilisé la formule de Bernoulli simplifiée :  $P = \frac{1}{2} \rho V^2$  avec  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  et  $V = 32 \text{ m/s}$ . On suppose que les hypothèses de Bernoulli simplifié sont vérifiées, on considère que le fluide est incompressible, que l'écoulement est stationnaire et que l'on néglige les effets de la viscosité.

- **Conditions aux limites** : Les pieds des tours ainsi que le "début" et la "fin" du pont sont considérées comme encastrées.

Avec les dimensions et les matériaux utilisés, on se propose de calculer la masse totale de notre pont (on va négliger les cordes verticales par soucis de simplicité).

Au final on trouve  $M = 1.53 \cdot 10^6$  tonnes, on trouve presque 2 fois le poids réelle du pont. Cela doit être dû à des erreurs de dimensions ou sur la vrai répartition des matériaux (on n'a pas considéré de creux dans la structure).

## 3.2 Étude de cas

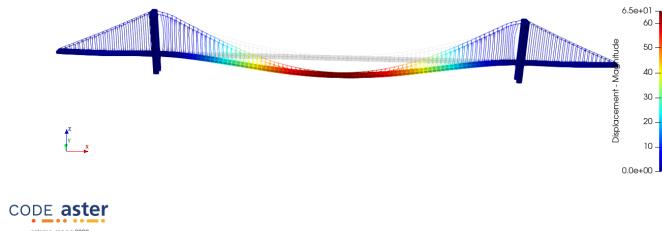
Trois cas de chargements distincts ont été étudiés pour évaluer les performances mécaniques du pont :

### 3.2.1 Cas 1 : Précontrainte + Poids

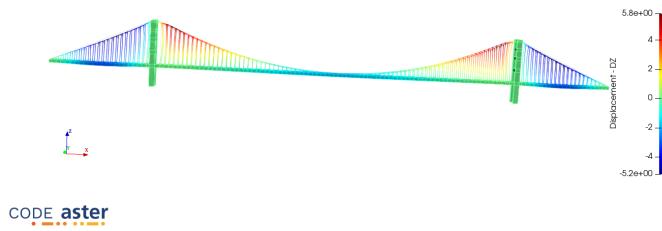
Dans ce premier scénario, seul la charge de la gravité est appliquée, en plus de la précontrainte induite par la variation de température sur les câbles principaux. Cela permet d'évaluer les déformations dues à la masse propre du pont et de valider la distribution de la précontrainte.

Lors des premières simulations effectuées avec la précontrainte théorique, nous avons constaté que le pont subissait des déformations excessives, notamment dans les zones centrales de l'ordre de  $10^2$ . Cela souligne l'importance de la précontrainte pour maintenir la stabilité structurelle et minimiser les flèches sous les charges permanentes et d'exploitation. La précontrainte permet également de mieux répartir les efforts dans les câbles et de réduire les contraintes dans les tours.

Pour remédier à cela, on a appliqué une précontrainte avec comme différence de température  $\Delta T = 2600$ . Cette précontrainte a permis de maintenir le pont en équilibre, avec des déformations d'un ordre raisonnable.



(a) Déformation selon z du pont avec application de la précontrainte théorique issue de  $\Delta T = 115$



(b) Déformation selon z du pont avec un  $\Delta T = 2600$

Figure 8: Poids

Cette grande différence entre la précontrainte théorique et celle qui nous permet de faire l'équilibre est peut-être due aux hypothèses faites sur la géométrie et les matériaux. On remarque tout de même un phénomène étrange, les câbles près des tours semblent être en traction alors qu'ils ne devraient pas l'être.

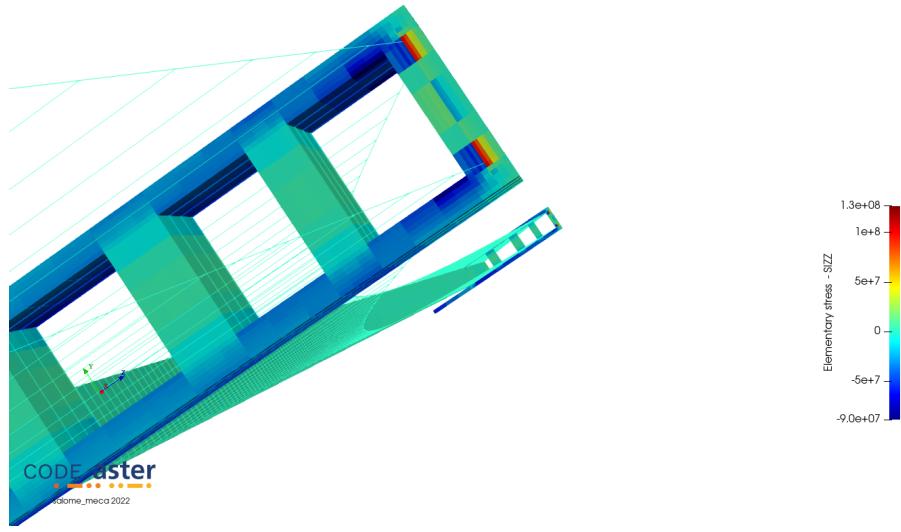
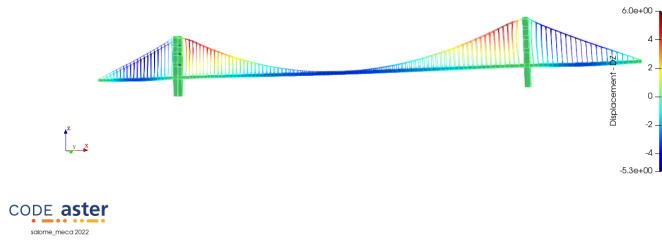


Figure 9: Déformation selon z du pont avec un  $\Delta T = 2600$ .

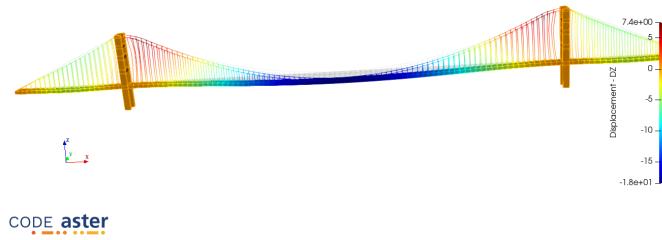
Sur cette figure, on observe que la contrainte est plus élevée au niveau des fixations des cordes au niveau des tours, ce qui semble logique.

### 3.2.2 Cas 2 : Précontrainte + Poids + Trafic

Dans ce cas, on a ajouté une charge uniforme représentant le trafic routier et les piétons sur la surface de la route, tout en conservant la précontrainte initiale des câbles. Ce scénario permet de simuler une situation courante de fonctionnement du pont.



(a) Déformation selon z du pont avec application du trafic routier



(b) Déformation du pont avec application d'un trafic routier exagéré :  $P = 55 \text{ kN/m}^2$

Figure 10: Poids + Trafic

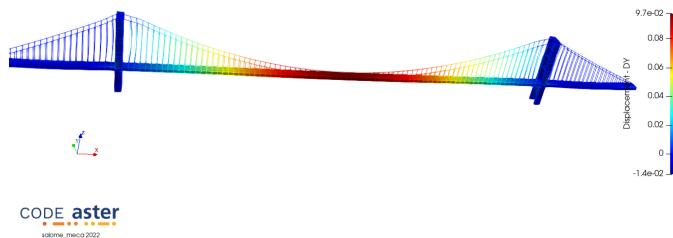
On remarque que la force surfacique de  $P = 5.5\text{kN/m}^2$  appliquée sur la route n'engendre presque pas de déplacement par rapport au cas précédent. Cela indique que le trafic routier modélisé ne semble pas influer grandement sur le pont, ce qui est plutôt positif.  
Pour observer la déformation du pont à cause du trafic, on va exagérer la valeur de pression exercée. On se retrouve avec cette figure-là qui montre bien l'action de cette force sur la route.

### 3.2.3 Cas 3 : Précontrainte + Poids + Trafic + Vent

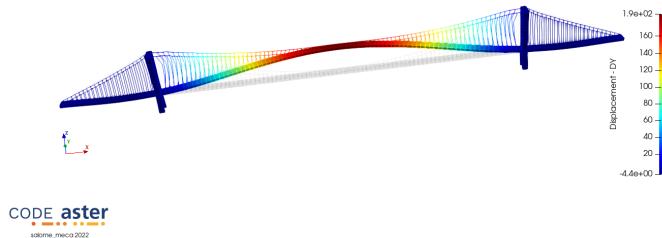
Le dernier cas combine les charges gravitaires, celles liées au trafic, les effets du vent et la précontrainte initiale. Ce scénario sert à évaluer la stabilité globale du pont sous des conditions climatiques défavorables.

La vitesse de vent moyenne enregistrée à San Francisco est de 32 m/s. Avec cette donnée, on obtient finalement une pression due au vent de valeur  $P = 627 \text{ N/m}^2$ . Puisque le vent est latéral, on se propose plutôt d'étudier le déplacement sur l'axe y.

Comme précédemment on se propose d'exagérer la valeur du vent pour observer son effet sur le pont.



(a) Déformation selon y du pont avec application du vent



(b) Déformation selon y du pont avec application de toutes les charges dont un vent exagéré de pression  $P = 1200000 \text{ N/m}^2$

Figure 11: Poids + Trafic + Vent

On remarque qu'il a fallu beaucoup augmenter P pour pouvoir avoir un effet non négligeable, beaucoup plus que pour le trafic. On en déduit donc que le pont est plus sensible aux charges sur la route que les charges latérales sur la tour et la route.

### 3.3 Résolution et post-traitement

```

1 DEBUT(LANG='FR')
2
3 mesh = LIRE_MAILLAGE(FORMAT='MED',
4   UNITE=2)
5
6 model = AFFE_MODELE(AFFE_MODELE,
7   MODELLATION='3D',
8   PHENOMENE='MECANIQUE'),
9
10   _{GROUP_Ma=(Pont_d', 'Tour_d', 'Tour_g', 'Pieds', 'Route', 'Fin', 'Bloc'),
11   GROUP_Me=(Gros_cables', ),
12   GROUP_Mt=(Petits_cables', ),
13   GROUP_Mv=(Valeurs_vent', ),
14   PHENOMENE='MECANIQUE')}
15
16 MAILLAGE(mesh, 10)
17
18 cable = AFFE_CARA_ELEM(ELEM=CABLE, model,
19   POSITION=F(CARA=1),
20   SECTION=CIRCLE,
21   VALE(0.5, ), )
22
23 GROUP_Ma('Gros_cables', ),
24 SECTION=CIRCLE,
25 VALE(0.001, ), )
26
27 beton = DEFI_MATERIAL(ELEM=L, F(=35000000000.0,
28   E=200000000000.0,
29   RHO=2650.0))
30
31 acier = DEFI_MATERIAL(ELEM=S, F(=ALPH=1.8e-05,
32   E=200000000000.0,
33   RHO=7860.0))
34
35 encas = AFFE_CHAR_MECA(DO1_IMPO=F(DX=0.0,
36   DO2=0.0,
37   DO3=0.0,
38   GROUP_Ma=('Debut', 'Fin', 'Pieds')),
39   MODEL_EleModel)
40
41 poids = AFFE_CHAR_MECA(DO1_IMPO=F(DIRECTION(0.0, 0.0, 1.0),
42   PESANTEUR=9.81,
43   GRAVITE=9.81,
44   GROUP_Ma='Gros_cables', ))
45
46 block_rot = AFFE_CHAR_MECA(DO1_IMPO=F(DY=0.0,
47   DRZ=0.0,
48   DDX=0.0,
49   DY=0.0,
50   DRZ=0.0,
51   GROUP_Ma='Block_rot', )),
52
53 MODEL_EleModel)
54
55 voulture_platon = AFFE_CHAR_MECA(MODELE=model,
56   PRES_REF=F(GROUP_Ma='Route', ),
57   PRES=S500.0)
58
59 vent = AFFE_CHAR_MECA(MODELE=model,
60   PRES_REF=F(GROUP_Ma='Pont_d', 'Tour_d', ),
61   PRES=1200000.0)
62
63 tempRecont = CREA_CHAMP(AFFE_F_GROUPE,
64   GROUP_Ma='Gros_cables', 'Petits_cables'),
65   NOM_CHE='TEMP',
66   VALE(200.0, ), )
67
68 MAILLAGE(mesh,
69   PROPS=1,
70   TYPE_CHEM=NOUD_TEMP_P)
71
72 materFl = AFFE_MATERIAL(AFFE_F(GROUP_Ma='Bloc', ),
73   MATER=(beton, ), )
74
75 AFFE_CHAR_MECA(MODELE=encas,
76   PRES_REF=F(GROUP_Ma='Gros_cables', 'Petits_cables'),
77   VALE_VALEUR=Valeurs_recont,
78   VALE_VALEUR=TEMP,
79
80 result = MEGA_STATIQUE(CARD, ELEMENTS,
81   CHAP, MATTER=materFl,
82   EXITE=F(CHAPRef=encas),
83   F(GROUP_Ma='Gros_cables', 'Petits_cables'),
84   F(MATER=acier, ),
85   F(CHAPRef=block_rot),
86   F(CHAPRef=voulture_platon),
87   F(CHAPRef=vent),
88   MODEL_EleModel)
89
90 IMPR_RESULT(F=NED,
91   RESULT=F(RESULTAT=result),
92   UNITE=2)
93 FIN()

```

Figure 12: Stage en .comm

Pour chaque cas de chargement, on a utilisé les fonctionnalités de **AsterStudy** pour :

- Créer le modèle mécanique en spécifiant les matériaux, les conditions aux limites et les chargements ;
- Résoudre les équations de la mécanique des structures à l'aide de l'analyse statique linéaire.

Les résultats obtenus incluent :

- **Déplacements** : Nous avons analysé les déplacements des différents éléments du pont, notamment ceux des câbles principaux et de la route.
- **Contraintes**

#### 3.3.1 Déplacements

Les résultats montrent que les déplacements maximaux se produisent au milieu de la travée principale sous l'effet combiné des charges d'exploitation et du vent. Par exemple :

- Sous le poids propre uniquement, le déplacement maximal est de 5.8 m ;
- Avec les charges d'exploitation, le déplacement augmente à 6 m ;
- Sous l'effet du vent, le déplacement total atteint 0.097 m.

#### 3.3.2 Contraintes

Les contraintes maximales calculées dans les câbles principaux restent en dessous de la limite élastique de l'acier.

### 3.4 Tentative de simulation de séisme

Dans notre étude, on avait prévu d'y inclure une étude sismique. On nous a même fourni une base de données d'un séisme de magnitude 8 survenu au Mexique en 2018. Malheureusement, notre calcul modal n'a pas pu se faire pour différentes raisons. Trop peu de valeurs propres, erreurs trop grandes. Pour pallier ce problème, on a joué avec les paramètres de tolérance, on a aussi raffiné le maillage mais sans succès.

On va vous détailler rapidement ce qu'on avait prévu de faire. L'idée était d'utiliser char\_meca.f pour fixer les déplacements des pieds de notre structure au cours du temps et d'encastrer la fin et le début du pont. Ensuite, on aurait lancé le calcul et observé les déformations du pont et le déplacement de l'ensemble de la structure. On aurait ainsi comparé les valeurs des déplacements simulés avec les déflections maximales observées dans la réalité. Selon la forme et les valeurs obtenues, on aurait remis en question notre modèle et tenté de voir si ce pont aurait tenu face à un séisme d'une telle ampleur.

## 4 Discussion des résultats

Les calculs réalisés montrent que le modèle simplifié du Golden Gate Bridge offre une bonne représentation de son comportement mécanique.

Cependant, plusieurs limites doivent être soulignées :

- La charge due au vent a été supposée uniforme, alors qu'en réalité elle varie selon la hauteur et la position ;
- Même chose pour la charge dû aux véhicules et aux piétons
- Les interactions dynamiques dues au trafic n'ont pas été prises en compte
- La géométrie a été simplifiée, on s'est contenté d'éléments en formes de pavés pleins, alors que dans la réalité les formes sont moins simples, il y a parfois des creux dans la géométrie
- On a fait une simplification au niveau des matériaux, le pont est normalement constitué de béton armé et non de béton pur, il aurait fallu adapter la géométrie afin de prendre en compte cela