

N° d'ordre : /2015/DM

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE BATNA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GENIE MÉCANIQUE

THÈSE PRÉSENTÉE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

**DOCTORAT SCIENCES**

EN

**MÉCANIQUE**

Option: **CONSTRUCTION MÉCANIQUE**

PAR

**FERROUDJI Fateh**

**CONCEPTION ET OPTIMISATION EN DYNAMIQUE FORCÉE D'UN  
NOUVEAU PROTOTYPE DE SYSTÈME DE SUIVEUR SOLAIRE À  
DEUX AXES**

Soutenue le: 26/10/2015

Devant le Jury:

BRIOUA Mourad	Prof.	Université de Batna	Président
OUTTAS Toufik	Prof.	Université de Batna	Rapporteur
SI AMEUR Mohamed	Prof.	Université de Batna	Examineur
BOUCHELAGHEM Abdelaziz	Prof.	Université d'Annaba	Examineur
REBIAI Cherif	M.C.A	E.N.S. Rouïba	Examineur
BRIMA Abdelhafid	M.C.A	Université de Biskra	Examineur



## RÉSUMÉ

La collecte énergétique du rayonnement solaire par des systèmes photovoltaïques peut s'effectuer de plusieurs manières : selon une orientation horizontale fixe, sur un plan incliné à la latitude du lieu, sur un plan optimal ou selon une orientation normale. Cependant les systèmes de suiveur solaire à deux axes constituent une alternative prometteuse et sont de plus en plus utilisés dans l'industrie moderne afin d'améliorer la quantité de la puissance produite par les systèmes photovoltaïques. Néanmoins, la conception de ces dispositifs doit donner une attention particulière à l'action du vent et de la neige comme des charges perturbatrices indésirables pour la stabilité et la fiabilité de la structure. L'exploitation des logiciels numériques industriels à outrance pour la modélisation géométrique des suiveurs solaires (Trackers) et la simulation 3D par éléments finis de leurs comportements statiques et dynamique permettent de mieux comprendre, optimiser et améliorer les performances mécaniques et vibratoires à la résistance et à la rigidité.

Deux objectifs principaux ont été visés dans cette recherche.

Le premier objectif est la conception d'un nouveau prototype du système de suiveur solaire à deux axes (azimut et l'élévation) sous le logiciel industriel SOLIDWORKS. L'innovation de la présente conception est l'utilisation d'une centrale hydraulique pour le mouvement d'élévation pour quatre suiveurs solaires développés et aussi la modélisation géométrique de la structure du système de suiveur solaire à deux axes de type MS-2 TRACKER10+ (à grande échelle 90 m<sup>2</sup>) est présentée.

Le deuxième objectif porte sur le traitement de la stabilité et de la fiabilité des deux suiveurs du point de vue mécanique et vibratoire. On a présenté la conception statique 3D par éléments finis sous SOLIDWORKS/Simulation des deux systèmes de suiveurs solaires soumis aux conditions aux limites de chargements critiques (vent et neige) et des liaisons pour différentes positions (postures) opératoires, ainsi que l'analyse dynamique modale et forcée du nouveau système afin de fixer et apprécier ses qualités dynamiques.

Toutefois, l'analyse des deux suiveurs NSSS2 et MS-2 pour les différentes positions de fonctionnement montrent que les systèmes sont stables et fiables car les propriétés mécaniques de résistance et de rigidité sont acceptables et les indices de performance dynamiques sont dans les normes prescrites par la réglementation de dynamique des structures.

Finalement, les travaux de cette thèse basés sur l'analyse statique et dynamique des deux suiveurs NSSS2 et MS-2 par éléments finis 3D peut être d'une grande aide non seulement pour la conception des suiveurs solaires à grandes échelles mais aussi peut constituer un outil technologique majeur (produit industriel) pour le design des structures mécaniques dynamiques en général.

---

### Mots clés :

Nouveau suiveur solaire à deux axes, analyse: "statique, modale et forcée", analyse par éléments finis 3D, conception CAO/DAO, charge du vent et de la neige, indice de performance dynamique, SOLIDWORKS/Simulation, postures.

---

## **ABSTRACT**

Energy collection of solar radiation by photovoltaic systems can be done in several ways: according to a fixed horizontal orientation, on an inclined plane to the latitude site, on an optimal plane or on a normal orientation to the sunlight. Therefore, the two axes solar tracker systems are promising alternative and are increasingly used in modern industry to improve the amount of power generated by photovoltaic systems. Hence, the design of these devices must give a special attention to the wind and snow loads as undesirable disturbance to the stability and reliability of the structure. The intensive exploitation of industrial digital software for geometric modeling of solar trackers and 3D finite element simulation of their static and dynamic behaviors provide well understanding, optimize and improve the vibratory and mechanic performances to resistance and rigidity.

This work focused on two main objectives.

The first objective is to design a new prototype of solar tracker system with two axes (azimuth and elevation) based on SOLIDWORKS/Simulation with local means available on the national market and equipped with simple orientation mechanisms. The innovation of this design is the use of a hydraulic unit for the elevation movement of four solar trackers developed and also the geometric modeling of the solar tracking structure with two axes of MS-2 TRACKER10+ type (great scale 90 m<sup>2</sup>).

The second objective is the treatment of the stability and reliability of the trackers as a mechanic and vibratory point of view. Initially, we presented the static and dynamic design based on 3D finite elements using SOLIDWORKS/Simulation of both solar tracking systems subjected to the boundary conditions of critical loads (wind and snow) and joint sin different operating positions (postures) and the modal and forced dynamic analysis of the new system to fix and appreciate their dynamic qualities.

Therefore, the analyses of the two NSSS2 and MS-2 Trackers for different operating positions show that the systems are stable and reliable because the mechanical properties of resistance and reliability are acceptable and the dynamic performance indices are within the standards prescribed by the regulations of dynamic of structures.

Finally, the work of this thesis based on the static and dynamic analysis of the two Trackers NSSS2 and MS-2 with 3D finite element can be of a great help not only for the design of large scale trackers but also can be a major technological tool (industrial product) for the design of dynamic mechanical structures in general.

---

## **Keywords:**

New solar tracker with two axes, "static, modal and forced" analysis: 3D finite element analysis, CAD / CAM design, wind and snow loads, performance index, SOLIDWORKS/Simulation, postures.

---

## المخلص

تجميع الطاقة من الأشعة الشمسية باستخدام الأجهزة الكهروضوئية يمكن أن يتم بعدة طرق: حسب توجيهه أفقي ثابت، على مستوي مائل حسب خط عرض الموقع ، على مستوي مائل بزواوية التقاط مثلي أو حسب توجيهه ناظمي للأشعة. لهذا، فإن أجهزة تعقب الأشعة الشمسية بمحورين هي بديل واعد وتستخدم بشكل متزايد في الصناعة الحديثة لتحسين كمية الطاقة المولدة من الأجهزة الكهروضوئية. لذلك ، فإن تصميم هذه الأجهزة يجب أن يعطي اهتماما خاصا لفعل الرياح والتلوج كأعمال إثارة غير مرغوب فيها من أجل استقرار وموثوقية الهيكل. إن استغلال البرمجيات الرقمية الصناعية بكثافة في التمثيل الهندسي لأجهزة تعقب الأشعة الشمسية (منتبعات الشمس) والمحاكاة ثلاثية الأبعاد باستعمال طريقة العناصر المنتهية لخواصها الستاتيكية والديناميكية أتاحت لنا الفهم الجيد، تحديد وتحسين الأداء الميكانيكي والاهتزازي بصفة مثلي من ناحية المقاومة والصلابة.

لقد ركزت هذه الدراسة على هدفين رئيسيين:

الهدف الأول هو تصميم النموذج الجديد لجهاز تعقب الأشعة الشمسية ذو محورين (السمت وارتفاع الشمس) باستخدام البرنامج الصناعي SOLIDWORKS. الإضافة العلمية والتقنية الجديدة في هذا التصميم هو استخدام وحدة مركزية هيدروليكية لحركة الرفع لأربعة متعقبات شمسية في وقت واحد وكذلك النمذجة الهندسية لهيكل جهاز تعقب الطاقة الشمسية ذو محورين من نوع MS-2 TRACKER10+ (بمقياس كبير 90م<sup>2</sup>).

الهدف الثاني هو معالجة ثبات و موثوقية أجهزة التتبع المدروسة من الناحية الميكانيكية و الاهتزازية، باستعمال المحاكات والتحليل الستاتيكي والديناميكي ثلاثي الأبعاد باستعمال طريقة العناصر المنتهية باستعمال SOLIDWORKS/Simulation تحت تأثير شروط الحدية من أحمال حرجة و روابط أثناء مختلف الوضعيات العملية، وكذا التحليل الحر و الديناميكي للجهاز الجديد من أجل تثبيت و تميمين مميزاته الديناميكية.

من أجل هذا، فإن تحليل الجهازين NSS2 و MS-2 في مختلف وضعيات التشغيل يبين أن هذين الأخيرين مستقران و لديهما موثوقية لأن الخواص الميكانيكية للمقاومة و الصلابة مقبولة ومؤشرات الأداء الديناميكي هي ضمن المعايير المنصوص عليها في ديناميكا الهياكل.

وأخيرا، فإن عمل هذه الأطروحة الذي اعتمد على التحليل الستاتيكي والديناميكي لجهازي تعقب الأشعة الشمسية NSS2 و MS-2 باستعمال طريقة العناصر المنتهية ثلاثية الأبعاد يمكن أن يكون عوننا كبيرا ليس فقط لتصميم منتبعات الشمس على نطاق واسع ولكن أيضا يمكن أن يكون أداة تكنولوجية هامة (إنتاج صناعي) لتصميم الهياكل الميكانيكية والديناميكية بشكل عام.

## كلمات مفتاحية:

نموذج جديد لجهاز تعقب الأشعة الشمسية ذو محورين، تحليل: "ستاتيكي، حر و ديناميكي" ، تحليل بطريقة العناصر المنتهية ثلاثي الأبعاد، تصميم CAO/DAO ، أحمال الرياح والتلوج، مؤشر الأداء الديناميكي، SOLIDWORKS/Simulation ، المواقف.

*À MES PARENTS, MOHAMED ET FATIMA-FERROUDJI*

*À MA FEMME, S. KEBABI*

*À MES CHERS FRÈRES & CHÈRES SŒURS*

*À TOUS MES AMIS*

*F. FERROUDJI*

## Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces années d'études.

Ce travail de thèse a été effectué au Laboratoire de Mécanique des Structures et Matériaux (**LaMSM**) du département de mécanique, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université de Hadj Lakhdar de Batna. Au cours de ces travaux, j'ai été encadré par le Professeur **OUTTAS Toufik** (**Directeur de thèse**), je tiens à le remercier pour la qualité du sujet de recherche qu'il m'a proposé, pour m'avoir fait bénéficier de ses connaissances scientifiques, ses conseils et son énorme aide.

### **Nous tenons à remercier:**

Professeur BRIOUA Mourad, Professeur Si Ameer Mohammed, Professeur BOUCHELAGHEM Abdelaziz, Maître de Conférences (M.C.A) REBIAI Cherif et Maître de Conférences (M.C.A) BRIMA Abdelhafid qui ont accepté de juger ce travail.

Mes remerciements vont ensuite à tout le personnel de l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien (**URER-MS**) Adrar et plus particulièrement mon ami et collègue de travail, le Doctorant **Chérif KHÉLIFI** pour l'aide qu'il m'a apporté lors de ce travail. Nous avons passé ensemble des moments inoubliables durant les quatre années de la préparation de ma thèse de doctorat.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à tous mes amis.

Je remercie mes parents pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Ils se sont beaucoup sacrifiés pour m'offrir toutes les conditions nécessaires afin que je puisse devenir ce que je suis. Ma reconnaissance envers eux est inexprimable.

Enfin, je remercie du plus profond de mon cœur, ma chère épouse, qui a toujours su m'épauler, trouver les mots justes et me rassurer de manière exemplaire tout au long de ces travaux.

Merci aux lecteurs de cette thèse.

## Table des matières

<b>Résumé</b> .....	<b>i</b>
<b>Dédicace</b> .....	<b>iv</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>v</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>vi</b>
<b>Table des figures</b> .....	<b>ix</b>
<b>Table des Tableaux</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Nomenclature</b> .....	<b>xiv</b>

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
------------------------------------	----------

### PREMIÈRE PARTIE

## Étude Bibliographique

<b>Chapitre 1 : Étude Bibliographique sur les Système de Suiveur Solaire</b> .....	<b>7</b>
<b>1.1 Introduction : les énergies renouvelables</b> .....	<b>8</b>
<b>1.2 Historique de l'énergie solaire</b> .....	<b>8</b>
1.2.1 Dès l'Antiquité .....	8
1.2.2 Au XVIIIème siècle .....	9
1.2.3 Au XIXème siècle .....	10
1.2.4 A partir du XXème siècle .....	11
<b>1.3 Le solaire photovoltaïque</b> .....	<b>14</b>
<b>1.4 Évolution de l'utilisation de l'énergie solaire</b> .....	<b>15</b>
<b>1.5 Les centrales solaires photovoltaïques</b> .....	<b>16</b>
<b>1.6 Rayonnement solaire quotidien / mensuel / annuel</b> .....	<b>17</b>
<b>1.7 Systèmes de Suiveur Solaire</b> .....	<b>18</b>
<b>1.8 Les différents systèmes de suiveur solaire</b> .....	<b>19</b>
1.8.1 Suiveur à 1 axe horizontal .....	20
1.8.2 Suiveur à 1 axe vertical incliné .....	20
1.8.3 Suiveur à deux axes .....	21
<b>Chapitre 2 : Dynamique et Vibrations Mécaniques Linéaires</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1 Introduction</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2 Vibrations mécaniques</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3 Systèmes mécaniques</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4 Équation de mouvement</b> .....	<b>26</b>

<b>2.5</b>	<b>Théorie de l'analyse statique</b> .....	<b>27</b>
2.5.1	Loi de comportement des matériaux .....	27
2.5.2	Le critère de la contrainte maximale de Von Mises .....	28
2.5.3	Coefficient de sécurité .....	28
<b>2.6</b>	<b>Vibration libres (analyse modale)</b> .....	<b>29</b>
2.6.1	Vibrations libres sans amortissement .....	29
2.6.2	Vibrations libres avec amortissement .....	30
<b>2.7</b>	<b>Vibration forcées</b> .....	<b>31</b>
2.7.1	Vibrations forcées sans amortissement .....	31
2.7.2	Vibrations forcées avec amortissement .....	33
<b>2.8</b>	<b>Système à plusieurs degrés de liberté (N-DDL)</b> .....	<b>35</b>
2.8.1	Signification des modes propres et fréquences propres .....	35
2.8.2	Détermination des fréquences propres de vibration .....	36
2.8.3	Détermination des modes propres de vibration .....	37
2.8.4	Propriété d'orthogonalité et normalisation des vecteurs modes .....	37

## DEUXIÈME PARTIE

# Conception & Simulation par MEF

<b>Chapitre 3</b>	<b>Conception Assisté par Ordinateur DAO/CAO de deux Systèmes de Suiveur Solaire</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Conception Assisté par Ordinateur (CAO)</b> .....	<b>40</b>
3.1.1	Introduction et historique de la CAO .....	40
3.1.2	Définition de la CAO .....	41
3.1.3	Outil CAO utilisé dans la thèse .....	42
3.1.4	Motivations du choix du logiciel SOLIDWORKS® .....	42
3.1.5	Modélisation géométrique en CAO .....	46
<b>3.2</b>	<b>Conception et modélisation géométrique de système MS-2 TRACKER 10+ et le nouveau prototype du système de suiveur solaire</b> .....	<b>47</b>
3.2.1	Description générale des systèmes .....	47
3.2.2	Système de poursuite .....	49
3.2.3	Structure des systèmes .....	51
<b>3.3</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>61</b>
<b>Chapitre 4</b>	<b>Simulation Numérique 3D par Éléments Finis</b>	<b>62</b>
<b>4.1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>Méthode des éléments finis</b> .....	<b>65</b>
<b>4.3</b>	<b>Description de l'outil de simulation utilisé</b> .....	<b>66</b>
<b>4.4</b>	<b>Les erreurs dans l'analyse par éléments finis 3D</b> .....	<b>68</b>

<b>4.5 Simulation numérique les deux modèles de systèmes du suiveur solaire par éléments finis 3D</b> .....	<b>68</b>
4.5.1 Simplification des modèles .....	69
4.5.2 Choix des matériaux de construction .....	70
4.5.3 Conditions aux limites .....	71
4.5.4 Maillage des systèmes .....	75
4.5.6 Choix du solveur .....	77
<b>4.6 Conclusion</b> .....	<b>78</b>

## TROISIÈME PARTIE

### Résultats & Discussions

<b>Chapitre 5 : Conception Statique des deux Systèmes de Suiveur Solaire à la Résistance</b>	<b>81</b>
<b>5.1 Introduction</b> .....	<b>82</b>
<b>5.2 Système de suiveur MS-2 TRACKER 10+</b> .....	<b>82</b>
<b>5.3 Système du nouveau prototype de suiveur solaire</b> .....	<b>87</b>
<b>5.4 Conclusion</b> .....	<b>99</b>
<b>Chapitre 6 : Analyse Dynamique (Libre &amp; Forcée)</b>	<b>100</b>
<b>6.1 Introduction</b> .....	<b>101</b>
<b>6.2 Indices de performance dynamique du nouveau système de suiveur</b> .....	<b>101</b>
6.2.1 Taux de participation massique .....	101
6.2.2 Facteur de qualité de la conception .....	102
6.2.3 Taux spécifiques des amplitudes des modes de résonance .....	102
<b>6.3 Analyse dynamique modale du suiveur</b> .....	<b>102</b>
6.3.1 Modes propres .....	102
6.3.2 Fréquences propres .....	110
6.3.3 Indices de performance dynamique modale du suiveur .....	112
<b>6.4 Analyse dynamique forcée du suiveur</b> .....	<b>115</b>
6.4.1 Modes et les indices de performance dynamique forcée du suiveur .....	115
6.4.2 Contraintes équivalentes de Von Mises .....	126
6.4.3 Déplacements résultants .....	128
<b>6.5 Conclusion</b> .....	<b>130</b>
<b>Conclusion générale et perspectives</b> .....	<b>132</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>136</b>
<b>Annexe de chapitre 3</b>	<b>142</b>
<b>Annexe de chapitre 4</b>	<b>149</b>
<b>Annexe de chapitre 6</b>	<b>154</b>

# Table des figures

## Chapitre 1

<b>Figure 1.1 :</b>	Incendie de la flotte romaine lors du siège de Syracuse en -212 . . . . .	9
<b>Figure 1.2 :</b>	Un miroir ardent . . . . .	10
<b>Figure 1.3 :</b>	Le concentrateur à lentilles de Lavoisier (1774) . . . . .	10
<b>Figure 1.4 :</b>	Plans et photos de la centrale thermique de Méadi en Egypte en 1913 . . . . .	12
<b>Figure 1.5 :</b>	Le four de Mont-Louis . . . . .	13
<b>Figure 1.6 :</b>	La première voiture solaire . . . . .	13
<b>Figure 1.7 :</b>	Puissance PV installée cumulée de 2000 à 2012 . . . . .	15
<b>Figure 1.8 :</b>	Nouvelle capacité PV installée de 2000 à 2012 . . . . .	16
<b>Figure 1.9 :</b>	centrale solaire photovoltaïque. (a) Centrale PV à Austin (Texas), (b) Centrale PV à Sacramento (Californie) . . . . .	17
<b>Figure 1.10 :</b>	Coordonnées explication des angles . . . . .	18
<b>Figure 1.11 :</b>	Production électrique . . . . .	19
<b>Figure 1.12 :</b>	Les différents types des suiveurs solaires . . . . .	19
<b>Figure 1.13 :</b>	Suiveur à 1 axe horizontal . . . . .	20
<b>Figure 1.14 :</b>	Suiveur à 1 axe vertical incliné . . . . .	20
<b>Figure 1.15 :</b>	Suiveur à deux axes ADES : modèle 5F-27 M . . . . .	21

## Chapitre 2

<b>Figure 2.1 :</b>	Vibration d'un oscillateur libre . . . . .	24
<b>Figure 2.2 :</b>	Modélisation d'un système mécanique : (a) rotor déséquilibré (un degré de liberté), (b) Modélisation d'un véhicule automobile . . . . .	25
<b>Figure 2.3 :</b>	Système mécanique à 1-DDL avec une excitation à la base, (a) masse-ressort, (b) masse-ressort-amortisseur . . . . .	26
<b>Figure 2.4 :</b>	Critères de Tresca et de Von Mises . . . . .	28
<b>Figure 2.5 :</b>	Facteur d'amplification et phase . . . . .	32
<b>Figure 2.6 :</b>	Réponse d'un système amorti à une force externe harmonique, $\bar{\omega}/\omega_0 = 0.2, \xi = 0.05, q_0 = 0$ et $v_0 = \omega_0 f_0/k$ . . . . .	34
<b>Figure 2.7 :</b>	Variation du facteur d'amplification et du déphasage pour différents coefficients d'amortissement . . . . .	34
<b>Figure 2.8 :</b>	Exemple de système mécanique à deux degrés de liberté 2-DDL . . . . .	35
<b>Figure 2.9 :</b>	Modes propres d'un bâtiment de trois étages . . . . .	36

## Chapitre 3

<b>Figure 3.1 :</b>	Le diagramme représentant les cinq générations de systèmes de CAO . . . . .	41
<b>Figure 3.2 :</b>	Quelques possibilités disponibles aux concepteurs via l'outil de CAO-SOLIDWORKS® . . . . .	45
<b>Figure 3.3 :</b>	Les primitives employées pour la création d'un solide via la technique CSG . . . . .	47
<b>Figure 3.4 :</b>	Le système de suiveur solaire MS-2 TRACKER 10+ . . . . .	48
<b>Figure 3.5 :</b>	Le suiveur MS-2 TRACKER 10+ sous l'installation dans la wilaya de Batna, Algérie . . . . .	48
<b>Figure 3.6 :</b>	Le nouveau prototype du système de suiveur solaire . . . . .	49
<b>Figure 3.7 :</b>	Système de poursuite du système MS-2 TRACKER 10+ (a) Mécanisme du mouvement d'azimut (b) Mécanisme du mouvement d'élévation . . . . .	49
<b>Figure 3.8 :</b>	Système de poursuite du nouveau système . . . . .	50
<b>Figure 3.9 :</b>	(a) la rotation d'élévation ; (b) la rotation en azimut . . . . .	51
<b>Figure 3.10 :</b>	Structure du suiveur solaire MS-2 TRACKER 10+ . . . . .	51
<b>Figure 3.11 :</b>	Structure du nouveau système de suiveur solaire . . . . .	52
<b>Figure 3.12 :</b>	Support en V MS-2 TRACKER 10+, (a) Support modélisé (b) Support réel . . . . .	53
<b>Figure 3.13 :</b>	Support en V du nouveau système, (a) Vue isométrique (b) Vue à droite . . . . .	53
<b>Figure 3.14 :</b>	La partie supérieure et la grille métallique du système MS-2 TRACKER 10+ . . . . .	54
<b>Figure 3.15 :</b>	La partie supérieure et la grille métallique du nouveau système . . . . .	55
<b>Figure 3.16 :</b>	La partie inférieure et la fondation du nouveau système de suiveur . . . . .	56
<b>Figure 3.17 :</b>	Centrale photovoltaïque (14.4 KW) en position 0° (horizontale). . . . .	56
<b>Figure 3.18 :</b>	Centrale photovoltaïque (14.4 KW) en position 50° . . . . .	57

## Chapitre 4

<b>Figure 4.1 :</b>	Discrétisation de différents solides et structures avec les éléments finis . . . . .	64
<b>Figure 4.2 :</b>	Caractère pluridisciplinaire de la M.E.F . . . . .	65
<b>Figure 4.3 :</b>	La démarche de la structure réelle au modèle informatique . . . . .	66
<b>Figure 4.4 :</b>	Types d'analyses sous SOLIDWORKS/Simulation . . . . .	68
<b>Figure 4.5 :</b>	Modèle du système de suiveur MS-2 TRACKER 10+ simplifié . . . . .	69
<b>Figure 4.6 :</b>	Modèle du nouveau système de suiveur simplifié . . . . .	70
<b>Figure 4.7 :</b>	Les déplacements imposés du système MS-2 TRACKER 10+ . . . . .	71
<b>Figure 4.8 :</b>	Les déplacements imposés du nouveau système . . . . .	72
<b>Figure 4.9 :</b>	Les chargements pour l'analyse statique du système MS-2 TRACKER 10+, (a) Cas de vent, (b) Cas de la neige . . . . .	74
<b>Figure 4.10 :</b>	Les chargements pour l'analyse statique du nouveau système, (a) Cas de vent, (b) Cas de la neige . . . . .	74

<b>Figure 4.11 :</b>	Les chargements pour l'analyse dynamique forcée du nouveau système, (a) Cas de vent, (b) Cas de la neige . . . . .	75
<b>Figure 4.12 :</b>	Maillage 3D du système MS-2 TRACKER 10+ par éléments finis 3D . . . . .	76
<b>Figure 4.13 :</b>	Maillage 3D du nouveau système par éléments finis 3D . . . . .	77

## Chapitre 5

<b>Figure 5.1 :</b>	Contraintes équivalentes de Von Mises : (a). dues au vent (b). dues à la neige . . . . .	83
<b>Figure 5.2 :</b>	Déplacements résultants : (a). dues au vent (b). dues à la neige . . . . .	84
<b>Figure 5.3 :</b>	Distributions de déformations équivalentes : (a). dues au vent (b). dues à la neige . . .	85
<b>Figure 5.4 :</b>	Coefficients des sécurités: (a). dues au vent (b). dues à la neige . . . . .	86
<b>Figure 5.5 :</b>	Contraintes équivalentes de Von Mises dues à la neige . . . . .	87
<b>Figure 5.6 :</b>	Contraintes équivalentes de Von Mises dues au vent . . . . .	89
<b>Figure 5.7 :</b>	Déplacements résultants dues à la neige . . . . .	90
<b>Figure 5.8 :</b>	Déplacements résultants dues au vent . . . . .	91
<b>Figure 5.9 :</b>	Déformations équivalentes dues à la neige . . . . .	92
<b>Figure 5.10 :</b>	Déformations équivalentes dues au vent . . . . .	94
<b>Figure 5.11 :</b>	Coefficients des sécurités dues à la neige . . . . .	94
<b>Figure 5.12 :</b>	Coefficient de sécurité due au vent . . . . .	96
<b>Figure 5.13 :</b>	Résultats de l'analyse statique du NSSS2 – valeurs extrêmes . . . . .	98

## Chapitre 6

<b>Figure 6.1 :</b>	Prédiction des quatre premiers modes de vibration du suiveur – Position $\beta=0^\circ$ . . . . .	104
<b>Figure 6.2 :</b>	Prédiction des quatre premiers modes de vibration du suiveur – Position $\beta=10^\circ$ . . .	105
<b>Figure 6.3 :</b>	Prédiction des quatre premiers modes de vibration du suiveur – Position $\beta=20^\circ$ . . .	106
<b>Figure 6.4 :</b>	Prédiction des quatre premiers modes de vibration du suiveur – Position $\beta=30^\circ$ . . .	107
<b>Figure 6.5 :</b>	Prédiction des quatre premiers modes de vibration du suiveur – Position $\beta=40^\circ$ . . .	108
<b>Figure 6.6 :</b>	Prédiction des quatre premiers modes de vibration du suiveur – Position $\beta=50^\circ$ . . .	109
<b>Figure 6.7 :</b>	Fréquences propres du suiveur . . . . .	111
<b>Figure 6.8 :</b>	Les taux des participations massiques dans les trois directions (X, Y et Z) pour différentes position du suiveur . . . . .	114
<b>Figure 6.9 :</b>	Prédiction des quatre premiers modes déformés du suiveur dues à la neige $\beta=0^\circ$ . . .	116
<b>Figure 6.10 :</b>	Prédiction des quatre premiers modes déformés du suiveur – Position $\beta=10^\circ$ . . . . .	117
<b>Figure 6.11 :</b>	Prédiction des quatre premiers modes déformés du suiveur – Position $\beta=20^\circ$ . . . . .	118
<b>Figure 6.12 :</b>	Prédiction des quatre premiers modes déformés du suiveur – Position $\beta=30^\circ$ . . . . .	119
<b>Figure 6.13 :</b>	Prédiction des quatre premiers modes déformés du suiveur – Position $\beta=40^\circ$ . . . . .	120
<b>Figure 6.14 :</b>	Prédiction des quatre premiers modes déformés du suiveur – Position $\beta=50^\circ$ . . . . .	121

---

<b>Figure 6.15 :</b>	Fréquences de résonances du suiveur . . . . .	123
<b>Figure 6.16 :</b>	Les taux des participations massiques dans les trois directions (X, Y et Z) pour différentes position du suiveur . . . . .	125
<b>Figure 6.17 :</b>	Contraintes équivalentes de Von Mises dues à la neige – $\beta=0^\circ$ . . . . .	126
<b>Figure 6.18 :</b>	Contraintes équivalentes de Von Mises dues au vent . . . . .	128
<b>Figure 6.19 :</b>	Déplacements résultants dues à la neige – $\beta=0^\circ$ . . . . .	128
<b>Figure 6.20 :</b>	Déplacements résultants dues au vent . . . . .	130

## Table des tableaux

<b>Tableau 2.1 :</b>	Coefficients d'amortissement structurel selon le type de matériau constitutif . . . . .	31
<b>Tableau 3.1 :</b>	Spécification les deux PV . . . . .	55
<b>Tableau 3.2 :</b>	Caractéristique techniques du nouveau système de suiveur solaire . . . . .	58
<b>Tableau 3.3 :</b>	Caractéristique techniques du système de MS-2 TRACKER 10+ . . . . .	59
<b>Tableau 3.4 :</b>	Caractéristique techniques les deux systèmes de suiveur solaire . . . . .	60
<b>Tableau 4.1 :</b>	Propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans les deux systèmes de suiveur. .	70
<b>Tableau 4.2 :</b>	Chargements statiques des deux suiveurs . . . . .	73
<b>Tableau 4.3 :</b>	Chargements dynamiques du suiveur . . . . .	73
<b>Tableau 4.4 :</b>	Information sur le maillage global des systèmes . . . . .	76
<b>Tableau 5.1 :</b>	Résultats de l'analyse statique du système MS-2 TRACKER 10+ – valeurs extrêmes . . . . .	86
<b>Tableau 5.2 :</b>	Résultats de l'analyse statique du NSSS2 – valeurs extrêmes . . . . .	96
<b>Tableau 6.1 :</b>	Les vingt premières fréquences propres des 6 positions du suiveur . . . . .	110
<b>Tableau 6.2 :</b>	Indices de performance de la structure du suiveur . . . . .	113
<b>Tableau 6.3 :</b>	Les vingt premières fréquences de résonances des 6 positions du suiveur . . . . .	122
<b>Tableau 6.4 :</b>	Indices de performance de la structure du suiveur . . . . .	124
<b>Tableau 6.5 :</b>	Valeurs extrêmes des contraintes équivalentes de Von-Mises du suiveur . . . . .	126
<b>Tableau 6.6 :</b>	Valeurs extrêmes des déplacements résultants du suiveur . . . . .	128

# Nomenclature

## Abréviation

CAO	Conception Assisté par Ordinateur
CS	Coefficient de Sécurité
DAO	Dessin Assisté par Ordinateur
DDL	Degré de Liberté
MCAO	Mécanique Conception Assistée par Ordinateur
MEF	Méthode des Eléments Finis
MS-2	MS-2 TRACKER 10+
NSSS2	Nouveau de Système de Suiveur Solaire à 2 axes
PV	Module photovoltaïque Solaire
SSS	Système de Suiveur Solaire
SSS1	Système de Suiveur Solaire à 1 axe
SSS2	Système de Suiveur Solaire à 2 axes
TPM	Taux de Participation Massique

## Nomenclature

$\gamma_S$ :	Angle zénith	[degré]
$\alpha_S$ :	Angle azimut	[degré]
$h$ :	Angle horaire	[degré]
$\delta$ :	Angle d'inclinaison	[degré]
$t$ :	Heure locale du jour	[S]
$d$ :	Jour de l'année	[Jour]
$\lambda$ :	Latitude de l'observateur	[---]
$M$	Masse	[kg]
$k$	Raideur	[N/m]
$t$	Temps	[sec]
$u(t)$	Déplacement en fonction de temps	[m]
$\dot{u}(t)$	Vitesse en fonction de temps	[m/s]
$\ddot{u}(t)$	Accélération en fonction de temps	[m/s <sup>2</sup> ]
$F(t)$	Force appliqué	[N]
$c$	Coefficient d'amortissement visqueux	[Ns/m]
$\{\sigma\}$	Tenseur des contraintes	[N/m <sup>2</sup> ]

$\{\varepsilon\}$	Tenseur des déformations	[---]
$\sigma_{Von Mises}$	Contrainte équivalente de Von Mises	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_I, \sigma_{II}$ et $\sigma_{III}$	Contraintes principales	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_e$	Limite élastique	[N/m <sup>2</sup> ]
$\omega_0, \omega_n$	Pulsation propre	[rad/sec]
$u_0$	Déplacement initiale	[m]
$v_0$	Vitesse initiale	[m/s]
$F$	Fréquence propre	[Hz]
$T$	Période propre	[sec]
$\xi$	Coefficient d'amortissement	[%]
$c_{cr}$	Amortissement critique	[%]
$\omega_D$	Pulsation amortie	[rad/sec]
$f_0$	Amplitude maximale	[m]
$R_d$	Facteur d'amplification	[kg]
$[M]$	Matrice de masse	[kg]
$[C]$	Matrice d'amortissement	[N/rd/s]
$[K]$	Matrice de raideur	[N/m]
$\{u(t)\}$	Vecteurs des déplacements	[m]
$\{\dot{u}(t)\}$	Vecteurs des vitesses	[m/s]
$\{\ddot{u}(t)\}$	Vecteurs des accélérations	[m/s <sup>2</sup> ]
$\{F(t)\}$	Vecteur de chargement	[N]
$\phi_n$	Rapport des déplacements	[---]
$u_r$	Déplacement de flexion du mode r	[m]
$\Omega_r$	Fréquence propre du mode r	[Hz]
$\Omega_1$	Fréquence fondamentale	[Hz]
$A_r$	Amplitude du mode r	[m]
$\xi_r$	Facteur d'amortissement du mode r	[---]
$X_{mass}, Y_{mass}, Z_{mass}$	Taux des participations massiques dans les directions x, y et z	[%]
$Q_r$	Facteur de qualité	[%]

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

# Introduction générale

Le problème de tous les jours dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante du besoin énergétique. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin fortement d'énergie pour mener à bien leur développement. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'importation de ressources d'énergies fossiles, motivée par des considérations économiques. D'autres facteurs comme les émissions de  $CO_2$  (le climat de la terre évolue vers le mauvais et les sources naturelles d'eau se raréfient), la réserve mondiale du pétrole diminue progressif et dans les années qui suivent il n'y aura pas assez du pétrole pour couvrir la demande. Pour toutes ces raisons, le développement et l'implémentation des énergies renouvelables propres est incontournable. Des ressources énergétiques illimitées et abondamment disponibles existent et doivent être exploitées. Il y'a de diverses sources renouvelables qui sont utilisées pour la génération d'énergie électrique, telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie de biomasse ...etc. [EL-ASH, 2010]. L'énergie solaire est un bon choix pour la génération d'énergie électrique, puisque l'énergie solaire est directement convertie en énergie électrique par les modules photovoltaïques solaires (PV) [HUL, 2008 & PAR, 2004].

La puissance et le sens des rayons solaires varient en permanence en raison de la rotation terrestre et de la composition de l'atmosphère. Les cellules des modules photovoltaïques à montage fixe ne peuvent transformer qu'une fraction de l'énergie lumineuse émise par le soleil en énergie électrique. Les systèmes de suiveurs solaires sont des dispositifs mobiles qui permettent de maintenir l'orientation des modules photovoltaïques vers le soleil. Ainsi, l'angle d'incidence reste constant et l'intensité de la lumière et par conséquent de l'énergie, reste stable [HOF, 2008 & BRE, 2010]. Cela permet non seulement d'exploiter efficacement les heures d'ensoleillement, mais aussi de tirer parti de la lumière diffuse, ce qui se traduit par un surplus d'énergie solaire de 20 à 50% et une meilleure rentabilité économique ainsi qu'un amortissement plus rapide des coûts d'établissement [ALE, 2010 ; ABU, 2008 & SEM, 2011]. Il y a deux types de systèmes de suiveurs solaires (SSS) de base : à un axe et à deux

axes. Les systèmes de suiveurs solaires à un axe (SSS1) tournant sur un axe pour dépister le soleil, faisant face à l'Est le matin et à l'Ouest l'après-midi ; ce type de suiveur a besoin d'un ajustement saisonnier d'angle d'inclinaison. Les systèmes de suiveurs solaires à deux axes (SSS2) suivent le soleil avec plus de précision dû à la combinaison des mouvements quotidiens et saisonniers ; ils sont plus efficaces que les suiveurs solaires à un axe [MOU, 2009].

La structure du SSS est exposée, durant son fonctionnement à des chargements cycliques complexes dus à des conditions environnementales sévères et variables, comme le cas des vents forts, des rafales et de la neige qui engendrent des efforts extrêmes (les excitations dynamiques), induisant ainsi des vibrations mécaniques forcées. Ces vibrations ont d'abord une influence directe sur la fiabilité, la résistance et l'usure de la structure. [GEN, 2009 & FERROUDJI A, 2014]. Ces vibrations sont l'un des problèmes sérieux pouvant entraver le bon fonctionnement et la durée de vie du système de suiveur. Ces problèmes sont couramment posés à l'ingénieur et doivent être pris en compte aussi bien au niveau de la conception que de la vérification de la structure du SSS.

La crise économique actuelle liée à la mondialisation, pousse forcément les industriels dans une politique de minimisation des coûts de la recherche pour le développement et l'augmentation des performances de leurs produits. En particulier l'ingénieur dans différents domaines industriels à investissement recourt aux outils numériques de simulation par les éléments finis à la place du procédé de prototypage et des tests expérimentaux qui sont très coûteux [KHÉLIFI A, 2014].

L'évolution importante des capacités des ordinateurs a apporté une puissance de calcul extraordinaire, notamment dans le domaine de la simulation numérique des phénomènes physiques et l'analyse des problèmes techniques de l'industrie moderne. Le Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) combiné avec les méthodes de calcul par éléments finis a permis désormais d'envisager des analyses de plus en plus complexes et nombreuses en phase de conception [BHA, 2005 ; BOU, 2010 & OÑA, 2009]. Cela a permis également de diminuer d'avantage les risques technologiques. Parmi les divers codes de simulation, le SOLIDWORKS/Simulation permet la résolution des problèmes statiques et dynamiques complexes des structures générées avec souplesse et efficacité par la Méthode des Eléments Finis (MEF) 3D [COS, 2008 ; FERROUDJI B, 2014 & KHÉLIFI B, 2014].

Ce travail de thèse qui entre dans le cadre de l'activité de recherche-développement du Laboratoire de Mécanique des Structures et Matériaux (**LaMSM**) de l'Université Hadj Lakhdar Batna et de l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien, (**URERMS**), d'Adrar, qui est rattachée au Centre de Développement des Énergies Renouvelables (**CDER**) de Bouzaréah, vise principalement à concevoir et à modéliser le comportement statique et dynamique (Modale & Forcée) d'un nouveau prototype de système de suiveur solaire à deux axes (**NSSS2**). L'apport du sujet est l'utilisation d'une centrale hydraulique pour le mouvement d'élévation du suiveur (une centrale hydraulique pour quatre NSSS2). La modélisation géométrique de la structure du NSSS2 est générée sous le logiciel industriel 3D Mécanique SOLIDWORKS®. La simulation des performances statiques et dynamique du NSSS2 est réalisée à l'aide du logiciel SOLIDWORKS/Simulation qui est basée sur la MEF. Le calcul est divisé en trois étapes : la première comporte un calcul statique, qui détermine les champs de contraintes équivalentes de Von Mises, les déplacements résultants, les déformations équivalentes et le coefficient de sécurité pour vérifier la rigidité et la résistance du NSSS2 sous la gravité et les deux chargements critiques de vent de 36m/s pour différents positions (postures en élévation) et de la neige en position horizontale. La seconde étape est consacrée à l'analyse dynamique modale et forcée du NSSS2 pour la prédiction des paramètres structurels optimaux en termes de fréquences, modes propres, taux des participations massiques TPM, les taux spécifiques des amplitudes des modes et les contraintes et les déplacements. Le but de l'analyse est de fixer les conditions de résonance de la structure sous les perturbations extérieures du vent (31m/s), du couple motoréducteur et de la neige qui assurent un facteur de qualité dynamique acceptable confirmant la stabilité, la sécurité et la fiabilité dynamique du système selon des normes standards.

## **Organisation de la Thèse**

La thèse est articulée autour de 3 parties :

- Étude bibliographique.
- Conception et simulation par la méthode des éléments finis (**MEF**).
- Résultats et discussions.

La **première partie** est constituée des chapitres 1 et 2. Le chapitre 1 est une synthèse sur les énergies renouvelables. En premier, on expose l'historique de l'énergie solaire, l'énergie

photovoltaïque et l'évolution de leurs utilisations. Ensuite, les centrales solaires photovoltaïques et le rayonnement solaire. Et enfin, on présente une analyse des technologies des différents types de suiveurs rencontrés sur le marché. Dans le chapitre 2, nous avons présenté un bref rappel de la dynamique et de la vibration mécanique linéaire des structures, établissant l'équation du mouvement, la théorie de l'analyse statique et donnant une description globale des formulations des vibrations libres et forcées.

La **deuxième partie** est constituée des chapitres 3 et 4. On a réalisé en chapitre 3, la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) des deux SSS2 (système de type MS-2 TRACKER 10+ (MS-2) "à grande échelle" & le NSSS2). Dans un premier temps, nous avons présenté un état de l'art sur l'utilisation de la CAO, Outil utilisé dans la thèse (SOLIDWORKS). Et par la suite le dessin et l'esquisse de tous les composants, l'assemblage, la vérification et la simulation de l'animation des deux structures de systèmes en mouvement. Le chapitre 4 porte sur la simulation numérique par la MEF. Après une introduction et une brève présentation de la Méthode, nous avons réalisé la simulation numérique de deux modèles de SSS2 (Type MS-2 & Nouveau prototype proposé).

La **troisième et dernière partie** est constituée des chapitres 5 et 6 qui présentent les résultats des travaux réalisés durant la thèse. Dans le chapitre 5, nous avons présenté et analysé les résultats de la simulation du comportement statique, en vue de vérifier la résistance et la rigidité des deux systèmes MS-2 et le NSSS2. Enfin, le dernier chapitre de cette recherche porte sur une analyse dynamique modale et forcée du NSSS2.

Enfin la thèse est clôturée par une conclusion générale et des perspectives

## Liste des publications et communications

### Articles de Journaux Internationaux avec actes publiés dans le cadre de cette thèse

- [1] **F. Ferroudji, T. Outtas, C. Khélifi & R. Mansouri** « Large-scale Dual Axis Sun Tracking System Modeling and Static Analysis by FEM» *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME/ IJENS* Vol. 14(04) pp. 92-97, 2004.
- [2] **F. Ferroudji, T. Outtas & C. Khélifi** « Design, Modeling and Element Static Analysis of a New Two Axis Solar Tracker Using SolidWorks/COSMOSWorks » *Applied Mechanics and Materials* Vols. 446-447 (2014) pp. 738-743 Trans Tech Publications, Switzerland.

### Articles Nationaux et Internationaux réalisés dans le cadre de mes activités de recherches à l'URERMS – Adrar.

- [1] **C. Khélifi, M. Ouali, F. Ferroudji & L. Adjlout** « Severity of Cracks Growths on Static Design of a Three Bladed Savonius Wind Turbine Using SolidWorks Simulation » *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME/ IJENS* Vol. 14(05) pp. 80-83, 2004.
- [2] **C. Khélifi, M. Ouali, F. Ferroudji & L. Adjlout** « Modeling and Static Analysis of an Aero-generator Savonius Cracked by Using SolidWorks/COSMOSWorks » *Applied Mechanics and Materials* Vols. 446-447 (2014) pp. 744-750 Trans Tech Publications, Switzerland.
- [3] **C. Khélifi, F. Ferroudji, M. Ouali & L. Adjlout** « Modélisation et Analyse Dynamique d'un Rotor Éolien à Axe Horizontal de Faible Puissance » *Revue des Sciences et de la Technologie -RST-* Vol 4, 2013.

### Articles de Congrès Internationaux

- [1] **F. Ferroudji, Ch. Khélifi & T. Outtas** « Modélisation Statique 3D d'un Aérogénérateur Savonius par SolidWorks et COSMOSWorks » *2<sup>ème</sup> International Conference on Energy and Sustainable Development ICESD'13*. Université Africaine d'Adrar. 19-20 February 2013.
- [2] **Ch. Khélifi, M. Ouali, F. Ferroudji & L. Adjlout** « Modal Analysis of a Small Savonius Aerogenerator Using SolidWorks/COSMOSWorks» *Proceeding 14<sup>th</sup> International Conference» Research and Development in Mechanical Industry" RaDMI 2014*, Topola, Serbia, September 18-21, 2014.

## **Partie I**

# **ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

# Chapitre

# Étude Bibliographique sur les **1**

# Systemes de Suiveur Solaire

## Sommaire

<b>1.1</b>	<b>Introduction : les énergies renouvelables</b> .....	<b>8</b>
<b>1.2</b>	<b>Historique de l'énergie solaire</b> .....	<b>8</b>
1.2.1	Dès l'Antiquité .....	8
1.2.2	Au XVIIIème siècle .....	9
1.2.3	Au XIXème siècle .....	10
1.2.4	A partir du XXème siècle .....	11
<b>1.3</b>	<b>Le solaire photovoltaïque</b> .....	<b>14</b>
<b>1.4</b>	<b>Evolution de l'utilisation de l'énergie solaire</b> .....	<b>15</b>
<b>1.5</b>	<b>Les centrales solaires photovoltaïques</b> .....	<b>16</b>
<b>1.6</b>	<b>Rayonnement solaire quotidien / mensuel / annuel</b> .....	<b>17</b>
<b>1.7</b>	<b>Systemes de suiveur solaire</b> .....	<b>18</b>
<b>1.8</b>	<b>Les différents systemes de suiveur solaire</b> .....	<b>19</b>
1.8.1	Suiveur à 1 axe horizontal .....	20
1.8.2	Suiveur à 1 axe vertical incliné .....	20
1.8.3	Suiveur à deux axes .....	21

## Résumé



Ce chapitre commence par une introduction sur les énergies renouvelables. Nous ferons ensuite un bref historique sur l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque ainsi que l'évolution de son utilisation. Ensuite, nous présentons les centrales solaires photovoltaïques et le rayonnement solaire. Puis nous dressons les différents SSS rencontrés sur le marché, leurs avantages et leurs inconvénients.

## **1.1 Introduction: les énergies renouvelables**

L'utilisation massive des énergies fossiles et fissiles, même si elle a rempli tout le champ de l'activité des hommes d'aujourd'hui, reste un phénomène secondaire à l'échelle de l'histoire humaine ; elle apparaît à travers deux pics, l'un au cours du XIXe siècle avec le charbon et la découverte des machines à vapeur, l'autre au XXe siècle avec le pétrole, le gaz et le nucléaire. Le monde a besoin d'inventer une nouvelle stratégie énergétique, qui pour respecter l'environnement global, devra d'abord reposer sur la modération et l'efficacité énergétique et inévitablement utiliser les sources renouvelables. L'irradiation solaire annuelle sur l'ensemble de la planète au niveau de la mer représente plus de 5000 fois l'énergie que nous consommons. À long terme - environ 50 ans - le potentiel extractible des différentes sources d'énergie renouvelable pourrait en pratique couvrir la consommation mondiale actuelle. Mais il est clair que la consommation d'énergie que connaît le monde actuellement, tend à s'accroître grâce à la poursuite de la croissance des pays industrialisés et à l'expansion démographique et économique des pays en voie de développement. Si aucun pays ne modifie sa politique énergétique (ou en l'absence d'une politique énergétique mondiale), les besoins énergétiques de la planète pourraient tripler d'ici à 2050. L'enjeu énergétique de ces prochaines années est donc triple; faire face d'une part à la disparition des ressources énergétiques actuelles, et d'autre part, à une demande toujours croissante, tout en préservant notre environnement. Cependant, seule une implication politique forte permettra de voir le développement de ces énergies renouvelables à grande échelle avant l'assèchement des énergies de stock.

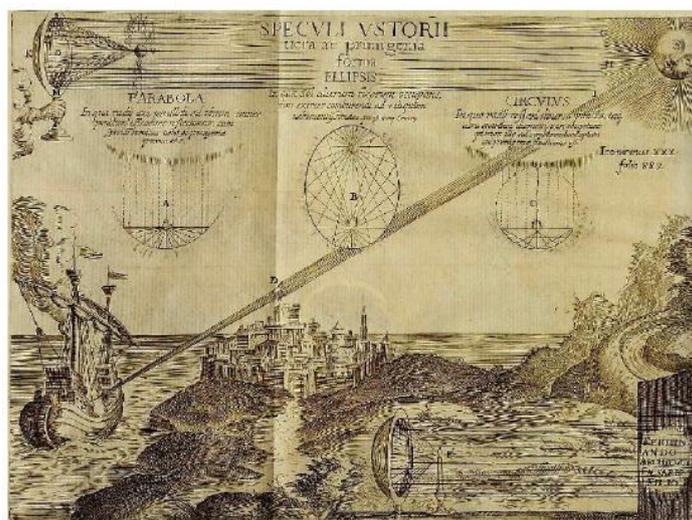
## **1.2 Historique de l'énergie solaire**

L'utilisation de l'énergie solaire est un fait très ancien. L'énergie solaire est à l'origine de la vie sur Terre: les premiers organismes photosynthétiques l'utilisaient déjà il y a 3,6 milliards d'années pour produire leurs matières organiques. Le but de cette sous-partie est de montrer que l'évolution des techniques d'exploitation de l'énergie solaire s'est faite en plusieurs phases.

### **1.2.1 Dès l'Antiquité**

Dans l'antiquité les Grecs et les Romains savaient utiliser l'énergie solaire. Pour allumer la flamme des jeux olympiques, ils utilisaient une sorte de miroir parabolique primitif, le skaphia, car pour eux seuls les rayons du Soleil étaient assez purs pour allumer cette flamme

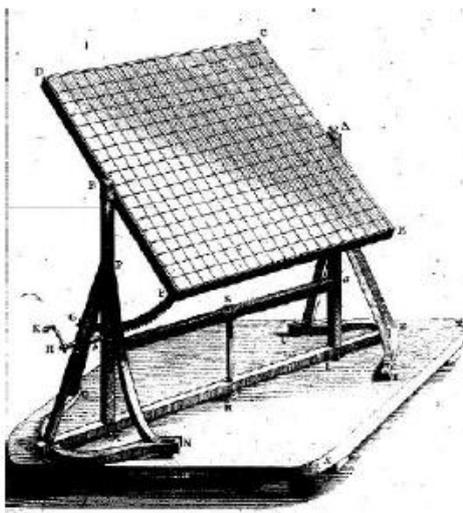
[EPIA, 2013]. Le philosophe grec Socrate (-470; -399) a enseigné l'architecture bioclimatique en expliquant que les maisons orientées au sud bénéficiaient de la chaleur du Soleil en hiver, tandis qu'en été, le soleil se retrouvait quasiment au-dessus des toits laissant les maisons dans une extrême fraîcheur. On raconte qu'Archimède (-287; -212) réussit à enflammer des bateaux de la flotte romaine qui assiégeait Syracuse en -212 (Figure 1.1), grâce à de nombreux miroirs géants en bronze polis tous orientés sur le même point du navire. Mais ce fait a fait débat au cours des siècles, certains savants jugeant en effet cette histoire improbable. Aujourd'hui on est pourtant presque sûr que cette histoire est un mythe, si l'on en croit l'expérience réalisée par des étudiants du MIT (Massachusetts Institute of Technology) qui ont réitéré l'expérience d'Archimède en 2005 et on réussit à enflammer en 10 minutes et à 30 mètres une reconstitution de bateau romain, qui cependant était sèche et immobile, ce qui a facilité l'inflammation.



*Figure 1.1 : Incendie de la flotte romaine lors du siège de Syracuse en -212 [MAT, 2012].*

### 1.2.2 Au XVIIIème siècle

Le Siècle des Lumières voit renaître l'intérêt pour le Soleil et les premières études et expériences sur son énergie. En 1747, le botaniste Buffon met au point une machine capable d'enflammer des planches en bois à 48 mètres (Figure 1.2). Cet engin est composé de 168 petits miroirs plans de 16 centimètres de largeur sur 22 de hauteur qui réfléchissent les rayons du soleil en un point unique permettant une élévation de la température. Ainsi, il parvient à enflammer du bois à une distance de 65 mètres, et de faire fondre de l'étain à 49 mètres, du plomb à 42 mètres, et de l'argent à 20 mètres.



*Figure 1.2: Un miroir ardent [BUF, 1747].*

Le célèbre chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) invente en 1774 un très puissant four solaire dans le but de faire fondre des métaux sans que ceux-ci soient pollués par les produits des combustibles (Figure 1.3). Pour cela il utilise deux lentilles convergentes montées comme un télescope et dont les foyers sont alignés sur une droite parallèle aux rayons du Soleil, et qui lui permettent d'obtenir une température d'environ 1755°C.



*Figure 1.3 : Le concentrateur à lentilles de Lavoisier (1774) [MAT, 2012].*

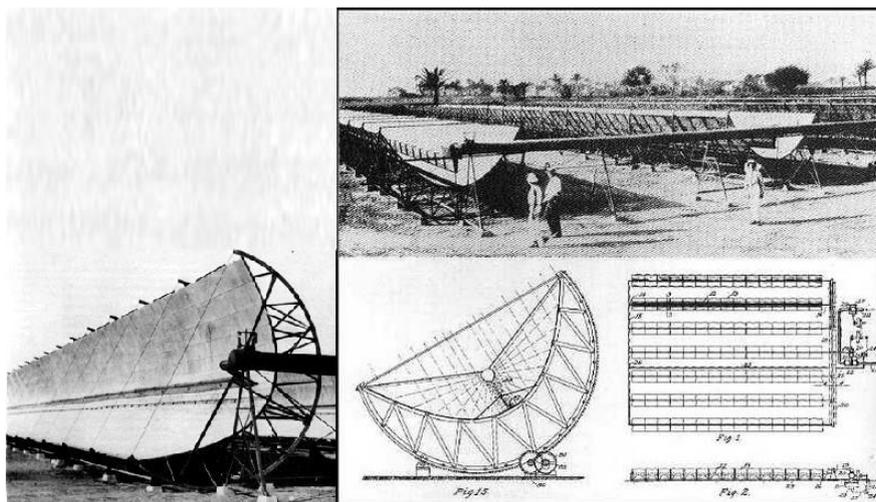
### 1.2.3 Au XIX<sup>ème</sup> siècle

Le XIX<sup>ème</sup> est marqué par la découverte de l'effet photovoltaïque et le perfectionnement des techniques d'exploitation du solaire thermique. En 1839, le physicien Alexandre Edmond Becquerel découvre par hasard l'effet photovoltaïque. Une nouvelle voie de l'exploitation de

l'énergie solaire s'ouvre alors. Il faudra attendre 1900 pour qu'Einstein explique cet effet et 1910 pour qu'il soit mis en évidence par Robert Andrew Millikan. En 1872, l'ingénieur suédois Charles Wilson construit un distillateur solaire au Chili dans le but d'alimenter en eau douce une mine. Sur une surface de 4700 m<sup>2</sup>, ce distillateur produisit pendant 40 ans 23000 litres d'eau par jour à un prix minime. En 1875, l'industriel allemand Werner Von Siemens décrit le principe d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le principe photovoltaïque devant l'Académie des Sciences de Berlin. Le professeur français Augustin Mouchot inventa le principe de poursuite du Soleil avec un capteur à concentration. En 1873, grâce à une subvention du conseil général de Tours il construit une machine de 4 m<sup>2</sup> qu'il présente en 1875 à l'Académie des Sciences. En 1877, c'est une subvention du conseil général d'Alger qui lui permet de construire un nouveau capteur de 20 m<sup>2</sup> couplé à une machine à vapeur qu'il expose lors de l'Exposition Universelle de Paris de 1878. L'engin, d'une puissance d'un demi-cheval (368 W), permet d'imprimer le journal par l'Exposition au Soleil à raison de 500 exemplaires/heures. La machine eut un grand succès et fut primée. Augustin Mouchot avait déjà deviné que les énergies fossiles que les occidentales commençaient à utiliser n'étaient pas inépuisables. C'est pour cela qu'il préconisait et étudiait l'énergie solaire qui selon lui était déjà l'énergie du futur. C'est ce qu'il écrivait dans le livre qu'il publiait en 1869, *La Chaleur Solaire et ses Applications Industrielles*.

#### **1.2.4 A partir du XXème siècle**

Après 1900, toutes les technologies découvertes au siècle précédant sont améliorées. De nouvelles découvertes sont faites et dès 1970 le solaire connaît un vif regain d'intérêt. Les premières centrales solaires sont construites, et les premières applications individuelles apparaissent. Le physicien anglais Charles Vernon Boys (1855; 1944) est l'inventeur du capteur cylindro-parabolique. Son invention servit pour la première fois en Egypte (Figure 1.4), à Meadi, où on construisit en 1912 une centrale thermique qui fonctionnait sur le principe de Boys, permettant d'irriguer une grande surface de cultures. Cette centrale était composée de 5 réflecteurs de 60 mètres de long pour une ouverture de 4 mètres qui sont couplés à une pompe permirent de pomper plus de 2000 litres d'eau par minute à partir de 1913, irriguant 200 hectares de champs de coton. Des installations similaires à celle-ci furent prévues dans le Soudan anglais et dans les colonies africaines de l'empire Allemand, mais ces centrales restèrent à l'état de projet à cause du début de la seconde guerre mondiale.



**Figure 1.4 :** Plans et photos de la centrale thermique de Méadi en Egypte en 1913.

A partir de 1920, aux Etats-Unis, des particuliers installent chez eux des chauffe-eau solaires, et des « Crystal House », maisons chauffées uniquement grâce à l'apport énergétique du Soleil, sont construites. Le français Félix Trombe (1906; 1985) invente le premier four solaire à concentration: en 1944, lors de leur fuite, les allemands abandonnent un projecteur de DCA. Ces projecteurs très puissants qui permettaient de repérer les avions ennemis dans le ciel nocturne sont des miroirs paraboliques orientables au foyer duquel on plaçait une puissante ampoule ce qui donnait un faisceau de lumière parallèle. Trombe décide de réutiliser le projecteur abandonné à l'envers et de jour. Le projecteur est placé de telle manière que les rayons du soleil sont concentrés au foyer du miroir. Quand on place une bûche de bois au niveau du foyer celle-ci s'enflamme instantanément. Il est le directeur de la construction d'un prototype de four solaire d'une puissance de 50 kW à Mont-Louis (Figure 1.5) dans les Pyrénées-Orientales. Puis il dirige celle du four solaire d'Odeillo d'une puissance de 1000 kW. C'est le plus puissant four solaire du monde. Il est utilisé par l'industrie.

Il faut attendre 1954 pour voir la création de la toute première cellule photovoltaïque au silicium. Elle est mise au point par les américains Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller, des laboratoires de la Bell Telephone. Mais la technologie mise au point est hors de prix: non seulement elle a un faible rendement mais en plus elle nécessite l'utilisation du silicium très cher à l'époque. Il faut attendre 1958 et l'invention d'une cellule d'un rendement de 8% pour son premier emploi par l'industrie aérospatiale. Le premier satellite équipé de cellules photovoltaïques, Vanguard 1, est donc lancé en 1958.



*Figure 1.5 : Le four de Mont-Louis.*

La première maison alimentée en électricité par des cellules photovoltaïques est construite en 1973. Puis le choc pétrolier de 1980 donne un grand élan aux technologies solaires devenant d'un coup moins chères. De nombreux projets de centrales thermiques solaires apparaissent dans le monde, comme la centrale Thémis en France dont la construction s'étale de 1980 à 1982. En Australie, la 1<sup>ère</sup> voiture solaire (Figure 1.6) parcourt 4000 km. Indépendamment du pétrole, de nombreux petits appareils portatifs sont équipés de cellule photovoltaïque comme des calculatrices ou des montres.



*Figure 1.6 : La première voiture solaire.*

Mais avec le contre-choc pétrolier de 1986, de nombreux projets sont arrêtés. Mais aujourd'hui, dans un contexte avéré de réchauffement climatique et de flambée des prix des énergies fossiles, l'énergie solaire est de nouveau propulsée sur le devant de la scène. L'exploitation du solaire par l'homme s'est donc déroulée en 3 phases:

- La découverte (Antiquité), et redécouverte (XVIII<sup>ème</sup> siècle).

- L'expérimentation (XVIIIème et XIXème siècles).
- Le développement à grande échelle des moyens d'exploitation (XIXème et XXème siècles).

Et elle n'est pas un fait récent, contrairement à ce que nous avons souvent tendance le penser.

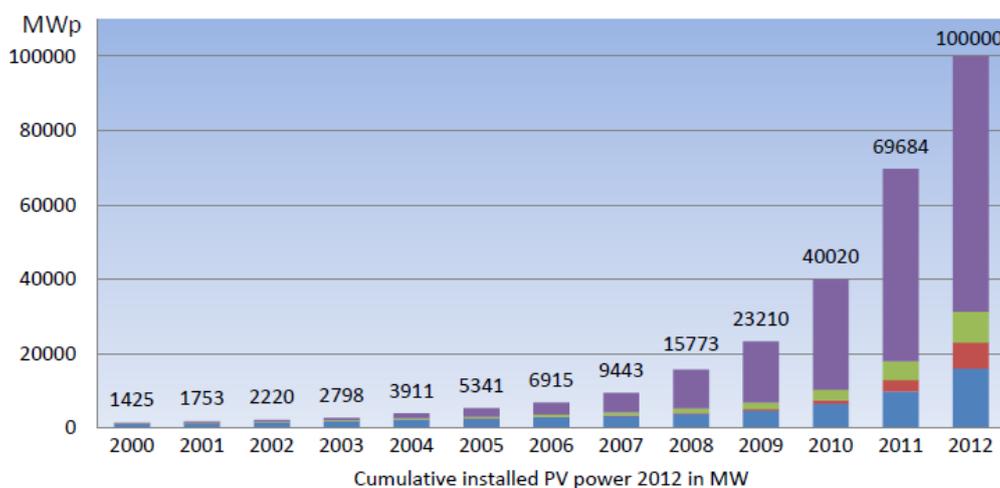
### **1.3 Le solaire photovoltaïque**

Le solaire photovoltaïque permet de récupérer et de transformer directement la lumière du soleil en électricité par des panneaux photovoltaïques. La conversion directe de l'énergie solaire en électricité se fait par l'intermédiaire d'un matériau semi-conducteur. La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre-elles pour former ce qu'on appelle un module solaire photovoltaïque. Par la suite, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimentée un réseau de distribution. La montée en puissance de l'énergie photovoltaïque devient aujourd'hui une réalité industrielle et économique qui doit relever les défis technologiques. Indépendamment des points communs avec les autres énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque présente plusieurs autres avantages. Tout d'abord, elle est relativement bien répartie à la surface du globe et facilement disponible, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. De plus, les panneaux photovoltaïques exigent peu d'entretien, sont fiables et ont relativement une longue durée de vie (25 ans), ce qui rend leurs coûts de fonctionnement très faibles. Enfin, la technologie photovoltaïque, dominée par le silicium, présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne pas de perturbations du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. Cependant, avec une intégration correcte dans les bâtiments, l'intrusion visuelle du photovoltaïque peut être minimale. Jusqu'en 1997, la technologie modulaire photovoltaïque se limitait aux applications professionnelles (bornes téléphoniques, télédétection, alarme, relais Télécom, ...etc.), ce qui assurait un développement de la technologie. Mais, avec des taux de croissance de 15% par an [IEA, 2006], il faut encore attendre jusqu'à 2020 pour que la production

mondiale annuelle atteigne un seuil satisfaisant. Autrement dit, la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire reste un procédé nouveau, ou au mieux l'énergie pour les sites isolés.

#### 1.4 Evolution de l'utilisation de l'énergie solaire

Au cours de la dernière décennie, l'énergie solaire PV a monté son énorme potentiel. La quantité de puissance PV installée a rapidement augmenté. Actuellement, la puissance PV installée à l'échelle mondiale est d'environ 100 GW. La Figure (1.7) montre la puissance PV installée cumulée.



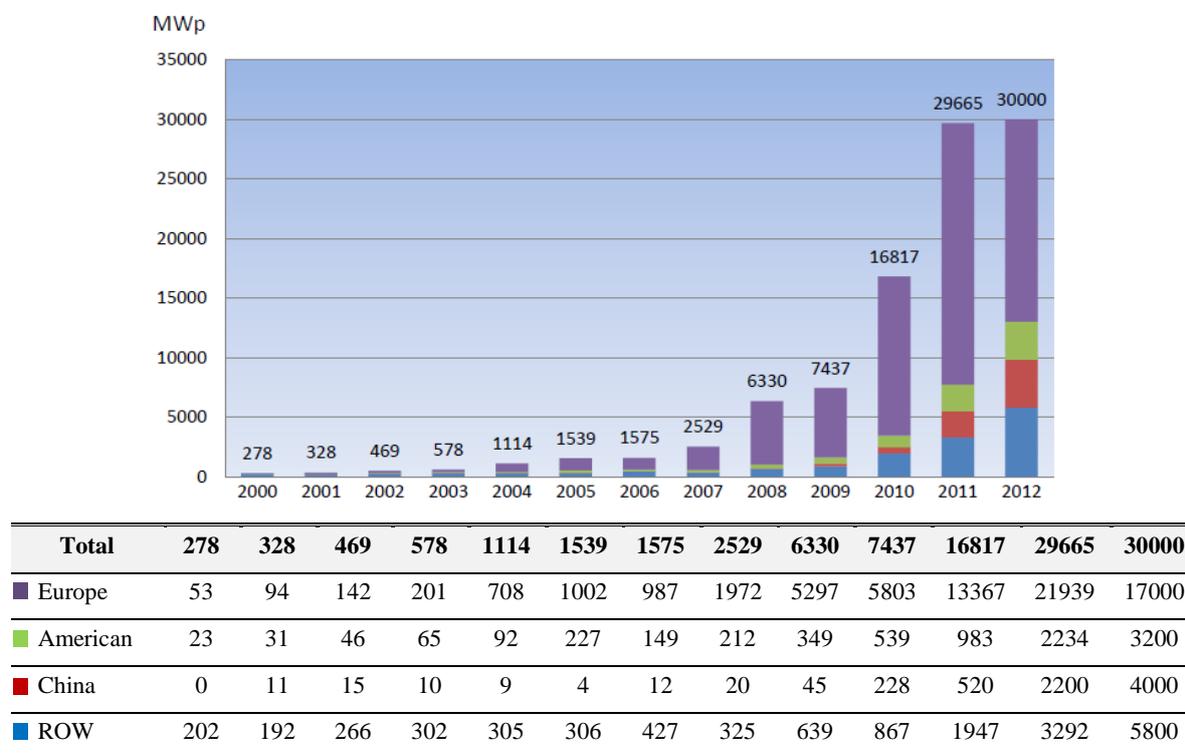
Total	1425	1753	2220	2798	3911	5341	6915	9443	15773	23210	40020	69684	100000
■ Europe	154	248	389	590	1297	2299	3285	5257	10554	16357	29777	51716	68716
■ American	146	177	222	287	379	496	645	856	1205	1744	2820	5053	8253
■ China	19	30	45	55	64	68	80	100	145	373	893	3093	7093
■ ROW	1106	1298	1564	1866	2171	2478	2905	3230	3869	4736	6530	9822	15938

**Figure 1.7 :** Puissance PV installée cumulée de 2000 à 2012 [EPIA, 2013].

Grace à d'importantes subventions en Allemagne, Espagne et Italie, la capacité du marché s'est accrue de manière exponentielle. Ainsi, les 15 GW installées en UE en font de loin le plus vaste marché mondial. La tendance du marché est un déplacement vers de nouveaux marchés étendus, tels que les USA, l'Inde et la Chine. Ces pays joueront un rôle important dans le proche avenir du PV.

La Figure (1.8) montre la nouvelle capacité PV installée. L'augmentation de la capacité annuelle installée est liée à une forte baisse du prix des composants. Depuis 2006, le coût d'un système PV a baissé de plus de 50%. Ainsi, le prix final standard en 2006 était autour de 5500 à 6000 Euro / kWc pour un système résidentiel, tandis qu'il était de 2400 à 2700 Euro / kWc

en 2011. L'industrie ayant toujours la capacité de réduire les marges, on s'attend à de nouvelles réductions du prix des systèmes PV. La parité réseau, autrement dit, le moment à partir duquel le prix du PV sera le même que celui des sources d'énergie conventionnelles, sera atteinte ces prochaines années.



*Figure 1.8 : Nouvelle capacité PV installée de 2000 à 2012 [EPIA, 2013].*

## 1.5 Les centrales solaire photovoltaïques

Le principe des centrales solaires photovoltaïques est extrêmement simple. Ces systèmes sont constitués d'un champ de modules solaires photovoltaïques reliés entre eux en série ou en parallèle, et branchés sur un ou plusieurs onduleurs. L'énergie est directement transformée en électricité dans les panneaux, et passe ensuite dans le réseau électrique vers la ville la plus proche. Les principales caractéristiques des centrales photovoltaïques sont :

- Haute fiabilité, pas de pièce mobile (sauf sur des systèmes de trackers, le mouvement est cependant très lent).
- Système silencieux.
- Entretien réduit, peu de cout de fonctionnement (coût de fonctionnement réduit).
- Production d'électricité uniquement le jour.

- Stockage de l'électricité difficile (coûts importants, perte de la charge au cours du temps), et possible à l'heure actuelle pour des puissances modérées.



(a)

(b)

**Figure 1.9 :** Centrale solaire photovoltaïque. (a) Centrale PV à Austin (Texas), (b) Centrale PV à Sacramento (Californie).

## 1.6 Rayonnement solaire quotidien / mensuel / annuel

La position du soleil par rapport à une position est donnée par l'angle le zénithal ( $\gamma_s$ ) et l'azimut ( $\alpha_s$ ). L'angle zénith est l'angle entre la verticale locale et la ligne qui relie l'observateur au soleil. L'azimut de soleil est la déviation de la position du soleil par rapport au sud. L'azimut du module PV par rapport au Sud est noté ( $\alpha$ ), et l'inclinaison par rapport à l'horizontal est notée ( $\beta$ ).

Le zénith et l'azimut dépendent de l'heure locale du jour ( $t$ ), du jour de l'année ( $d$ ) et de la latitude de l'observateur ( $\lambda$ ). L'angle horaire ( $h$ ) en degrés est défini ainsi [CHO] :

$$h = \frac{360}{24}(t - 12) \quad (1.1)$$

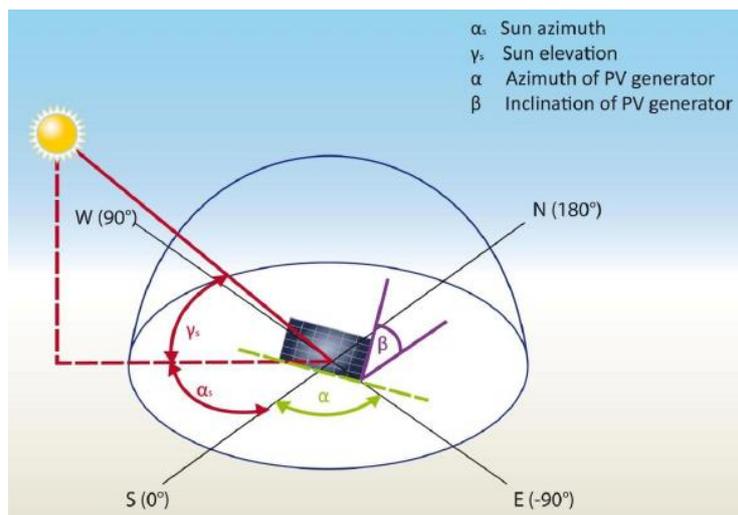
Chaque jour est défini par l'angle d'inclinaison ( $\delta$ ), qui représente la latitude du soleil. L'angle de déclinaison solaire en degrés est défini ainsi :

$$\delta = 23.44 \cdot \sin \left[ 360 \cdot \left( \frac{d-80}{365.25} \right) \right] \quad (1.2)$$

Les angles zénith et azimut sont obtenus grâce aux équations suivantes :

$$\cos \gamma_s = \sin \delta * \sin \lambda + \cos \delta * \cos \lambda * \cosh \quad (1.3)$$

$$\tan \alpha_s = \frac{\sinh}{\sin \lambda \cosh - \cos \lambda \tan \delta} \quad (1.4)$$



**Figure 1.10 :** Système de coordonnées expliquant les angles Zénith et Azimut [REN, 2013].

## 1.7 Systèmes de suiveur solaire

La puissance et le sens des rayons solaires varient en permanence en raison de la rotation terrestre et de la composition de l'atmosphère. Les cellules des modules photovoltaïques à montage fixe ne peuvent transformer qu'une fraction de l'énergie lumineuse émise par le soleil en énergie électrique.

Les SSS ou trackers solaires sont des dispositifs mobiles qui permettent de maintenir l'orientation des modules photovoltaïques vers le soleil. Ainsi, l'angle d'incidence reste constant, et l'intensité de la lumière et par conséquent de l'énergie, reste stable. Cela permet non seulement d'exploiter efficacement les heures d'ensoleillement, mais aussi de tirer parti de la lumière diffuse, ce qui se traduit par un surplus d'énergie solaire de 25 à 50 % [ABU, 2008 ; ALE, 2012 & SEM, 2011] et une meilleure rentabilité économique ainsi qu'un amortissement plus rapide des coûts d'acquisition.

Le diagramme comparatif de production électrique (Figure 1.11) montre pour une journée ensoleillée d'été, le gain de production électrique obtenu en passant d'une installation fixe à une installation équipée d'un suiveur de trajectoire solaire. Les principales caractéristiques différenciant les suiveurs sont les suivantes :

- Le gain en production électrique (par rapport à des panneaux solaires fixes).
- L'orientation mono ou multi axiale.
- La précision du positionnement vis-à-vis du soleil (type d'asservissement).
- La robustesse (tenue au vent) et la fiabilité.
- Le coût.

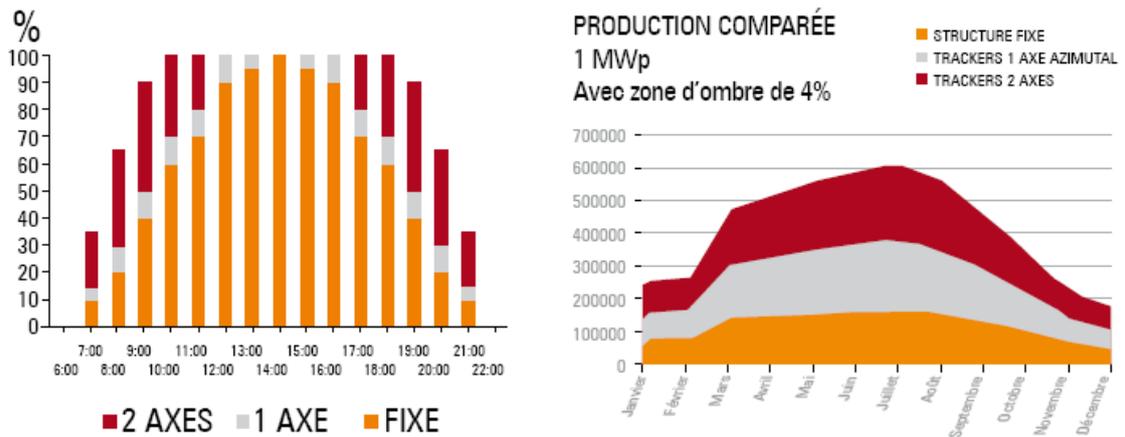


Figure 1.11 : Production électrique [JAG, 2013 & MEC, 2013].

### 1.8 Les différents systèmes de suiveur solaire

Le rendement des panneaux solaires peut être amélioré en suivant deux logiques. La première consiste à suivre l'azimut (c'est-à-dire la course du soleil), les panneaux doivent donc suivre le soleil d'Est en Ouest. La deuxième consiste à améliorer l'incidence des rayons solaires en ajustant la hauteur des panneaux. L'incidence des rayons solaires dépend des saisons (en hiver le soleil est en moyenne plus bas qu'en été) et de l'heure de la journée. Les différents types de suiveurs (Figure 1.12) rencontrés sur le marché sont les suivants :

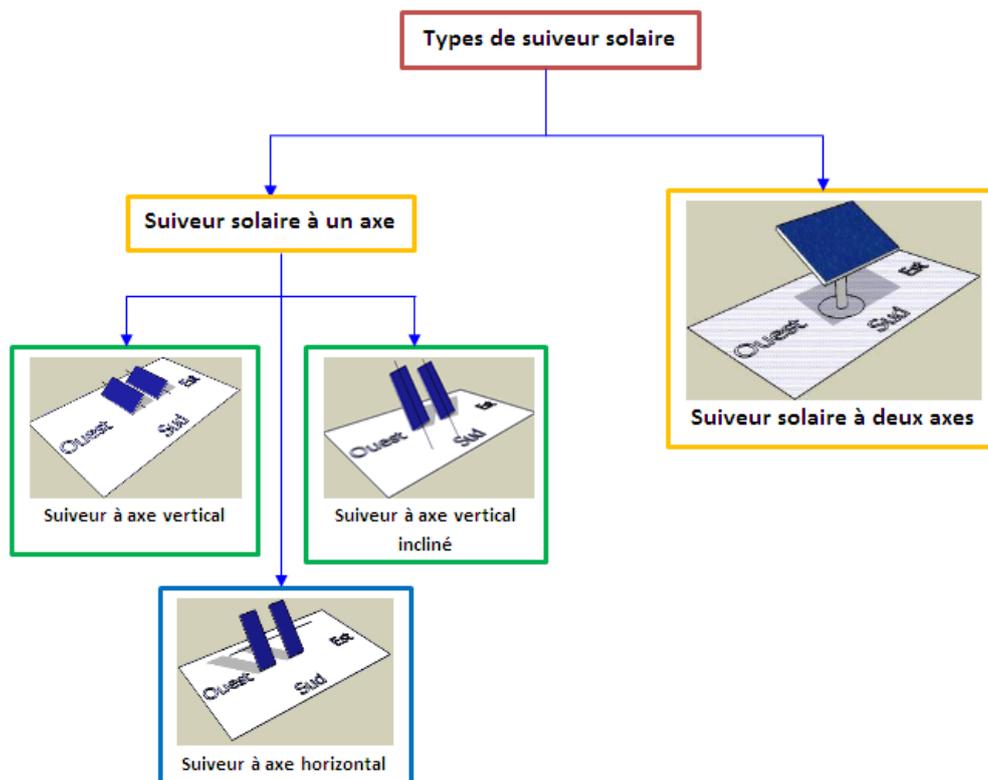
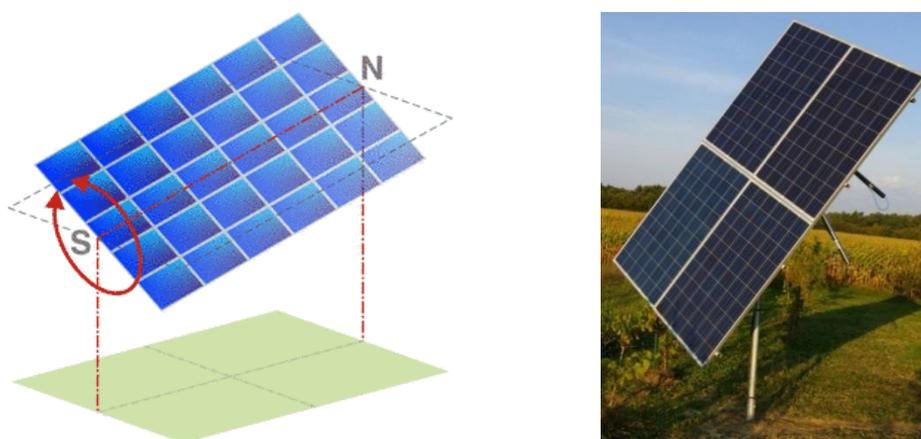


Figure 1.12 : Les différents types des suiveurs solaires [CHO].

### 1.8.1 Suiveur à 1 axe horizontal

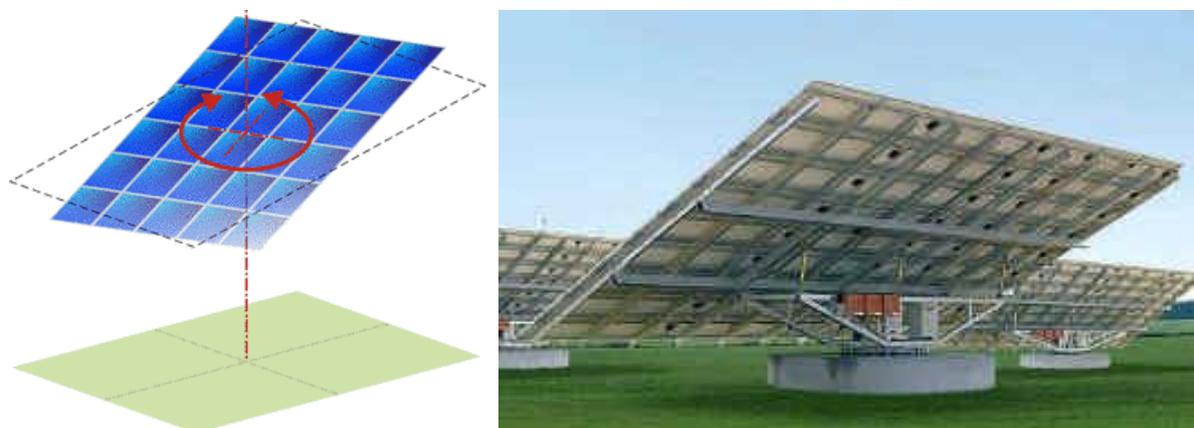
Ce type de suiveur n'apporte que très peu de gain par rapport à un système fixe. Il est plus intéressant d'utiliser des suiveurs à un axe vertical. En revanche, sa conception est la plus simple de l'ensemble des suiveurs et peut ne pas entraîner une diminution trop significative du GCR si ce type de suiveur est équipé d'un organe de régulation appelé backtracking, qui empêche d'incliner davantage les modules dès que les rangées se font mutuellement de l'ombre. Sans backtracking, en conservant un GCR de 45%, il faudrait un suiveur permettant une plage d'inclinaison allant de 10 à 30° pour obtenir la meilleure solution. Cependant, le gain resterait assez faible : de l'ordre de 2,2% (ce gain ne compense pas le surcoût).



*Figure 1.13: Suiveur à 1 axe horizontal.*

### 1.8.2 Suiveur à 1 axe vertical incliné

Ce type de suiveur permet un gain d'environ 20% pour un GCR de 25%. Il est souvent moins imposant que les suiveurs à 2 axes, moins coûteux et permet d'installer plus de puissance sur un terrain donné comparé aux 2 axes.



**Figure 1.14 :** *Suiveur à 1 axe vertical incliné [MEC, 2013].*

### 1.8.3 Suiveur à deux axes

Les suiveurs à deux axes permettent un gain d'environ 30% pour un GCR d'environ 10%. Ce type de suiveur est très imposant et visible de loin.



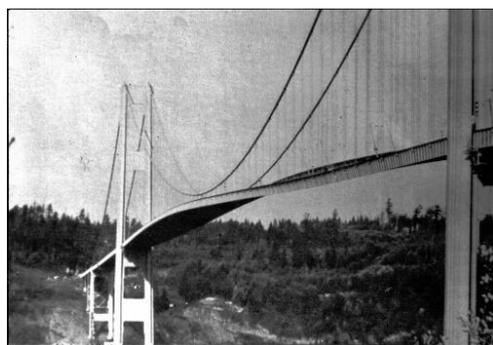
*Figure 1.15: Suiveur à deux axes ADES : modèle 5F-27 M [ADE, 2013].*

*Chapitre***Dynamique et Vibrations****2****Mécaniques Linéaires****Sommaire**

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Vibrations mécaniques</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3</b>	<b>Systèmes mécaniques</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>Équation de mouvement</b> .....	<b>26</b>
<b>2.5</b>	<b>Théorie de l'analyse statique</b> .....	<b>27</b>
2.5.1	Loi de comportement des matériaux .....	27
2.5.2	Le critère de la contrainte maximale de Von Mises .....	28
2.5.3	Coefficient de sécurité .....	28
<b>2.6</b>	<b>Vibrations libres (analyse modale)</b> .....	<b>29</b>
2.6.1	Vibrations libres sans amortissement .....	29
2.6.2	Vibrations libres avec amortissement .....	30
<b>2.7</b>	<b>Vibrations forcées</b> .....	<b>31</b>
2.7.1	Vibrations forcées sans amortissement .....	31
2.7.2	Vibrations forcées avec amortissement .....	33
<b>2.8</b>	<b>Système à plusieurs degrés de liberté (N-DDL)</b> .....	<b>35</b>
2.8.1	Signification des modes propres et fréquences propres .....	35
2.8.2	Détermination des fréquences propres de vibration .....	36
2.8.3	Détermination des modes propres de vibration .....	37
2.8.4	Propriété d'orthogonalité et normalisation des vecteurs modes .....	37

**Résumé**

Ce chapitre présente quelques rappels sur l'analyse vibratoire. Après une introduction sur les approches du linéaire, on commence brièvement par les vibrations et les systèmes mécaniques, ensuite nous présenterons de manière plus détaillée les vibrations libres et les vibrations forcées, on concentrera sur l'équation du mouvement et leur solution. Ensuite, on verra que dans les deux cas sans et avec amortissement. On présente le système à N degrés de liberté, ainsi que la signification et la détermination des modes propres et fréquences propres de vibration. Et enfin, on présentera quelques paramètres qui nous intéressent dans ce travail, ainsi que l'amortissement visqueux élastique et le facteur de sécurité.



## 2.1 Introduction

D'un point de vue historique, Dès le début du XVII<sup>ème</sup> siècle, la théorie des vibrations est un sujet d'étude, par le problème de la corde vibrante notamment. On avait observé que la corde avait des parties qui vibraient et que certains points appelés "nœuds" n'étaient jamais en mouvement. De plus, on avait remarqué que la présence d'un nombre important de ces "nœuds" impliquait que les vibrations étaient à plus haute fréquence que dans le cas sans nœud. En 1759, Lagrange résoudra de manière analytique le problème de la corde vibrante [LAG, 1759], en la supposant composée d'un nombre fini de particules possédant chacune une masse. Il établira, ainsi, qu'il existe un nombre de fréquences indépendantes égale au nombre de particules, et en passant à la limite il démontrera que les fréquences sont les fréquences harmoniques de la corde vibrante.

Ces résultats ont servi de prémices au travail de Rayleigh (1845) [STR, 1998], qui dans son traité nommé Theory of Sound, publié en 1877, introduit les concepts fondamentaux des oscillations d'un système linéaire autour d'une position d'équilibre, et démontre l'existence des modes propres et des fréquences propres pour les systèmes discrets et continus. Les principes introduits dans ce traité sont encore aujourd'hui appliqués tels quels.

Ensuite, au cours des années 20, les besoins de structures légères en aéronautique ont permis de développer l'étude des problèmes de vibration et de dynamique. Il s'agissait entre autres de prédire le comportement aéroélastique des avions. Ainsi pendant une quarantaine d'années, on développa des méthodes plutôt analytiques avec des structures définies par un petit nombre de degrés de liberté (Rayleigh-Ritz ...), en linéaire.

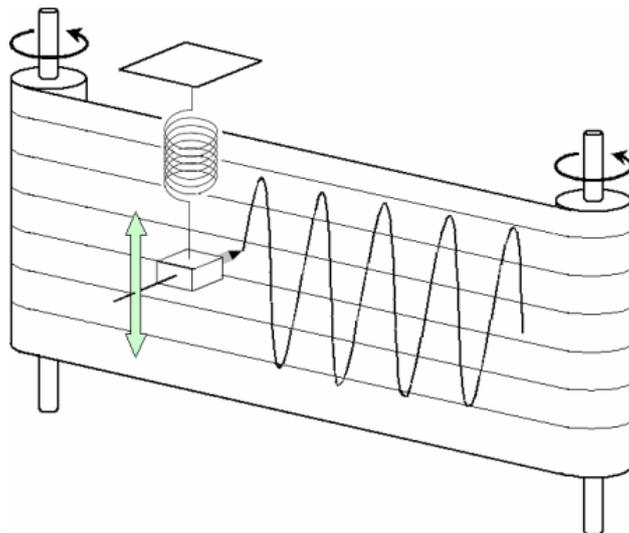
Puis, la naissance et le développement de l'informatique au cours des années soixante a entraîné l'apparition des méthodes matricielles (discrétisation d'expressions variationnelles) puis le développement des codes éléments finis, s'adaptant à l'augmentation constante de la taille des systèmes traités. Ainsi on est aujourd'hui capable d'élaborer des modèles numériques performants pour prédire le comportement de structures en dynamique. De même, l'informatique a beaucoup apporté au traitement de résultats expérimentaux, avec entre autres le développement des techniques d'analyse modale (depuis 1960) et celui des logiciels dédiés à l'analyse vibratoire expérimentale de structures [PÉR, 2004].

## 2.2 Vibrations mécaniques

On appelle couramment vibration un mouvement (périodique ou non) autour d'une position d'équilibre. Un pendule oscillant, une masse suspendue à un ressort, tels que des exemples élémentaires bien connus (Figure 2.1). Selon la norme AFNOR E90.350 [AFN, 1994], une vibration peut être définie par la « *variation avec le temps de la valeur d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque la grandeur est alternativement plus grande ou plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence* ».

Les vibrations mécaniques sont liées à l'existence d'efforts dynamiques internes ou externes au mécanisme. Les efforts internes peuvent être fonctionnels mais dans la plupart des cas, ils relèvent d'un mauvais fonctionnement lié à un déséquilibre de rotor, à un désalignement d'arbre, à une usure mécanique, à une cavitation, etc..... Dans le cas d'efforts externes, ils sont associés à des excitations naturelles comme le vent, le déplacement de charges ou encore liés à l'environnement vibratoire des mécanismes (séismes, ...).

Dans le cas général, les vibrations dépendent de la forme de l'excitation. On est ainsi amené à caractériser deux principaux régimes : un régime libre (Vibrations libres) caractérisé par une excitation type impulsion et un régime forcé (Vibrations forcée) qui se caractérise par des mouvements synchrones à une excitation périodique.



**Figure 2.1 :** *Vibration d'un oscillateur libre [NES, 1972].*

## 2.3 Systèmes mécaniques

Avant de poursuivre dans la théorie des vibrations mécaniques linéaires, il nous faut maintenant définir qu'est qu'un système mécanique : c'est un ensemble composé d'éléments ayant des propriétés de masse, de raideur et d'amortissement, les trois paramètres déterminant le comportement dynamique.

Un système mécanique peut être discret ou à constantes localisées, lorsque les éléments constitutifs sont isolés et supposés ponctuels. Dans ce cas, le mouvement est décrit par des équations différentielles ordinaires et un nombre fini de paramètres permet de résoudre le problème. Si le système est continu ou à constantes réparties, il y a une infinité de paramètres possibles. Dans ce cas, le mouvement est fonction du temps et de l'espace. Il est régi par des équations différentielles aux dérivées partielles.

Souvent, la structure est simplifiée : on la divise en un nombre de masses ponctuelles reliées par des éléments élastiques et des éléments dissipatifs d'énergie. Pour cela, il faut choisir un certain nombre de points (nœuds) auxquels on affecte une masse et une raideur [RAZ, 2010].

En général, le système le plus simple (un point matériel) possède 3 degrés de liberté dans l'espace. Un solide en a 6, selon sa complexité et les liaisons auxquelles il est assujéti. Un système déformable possède théoriquement un nombre infini de degrés de liberté.

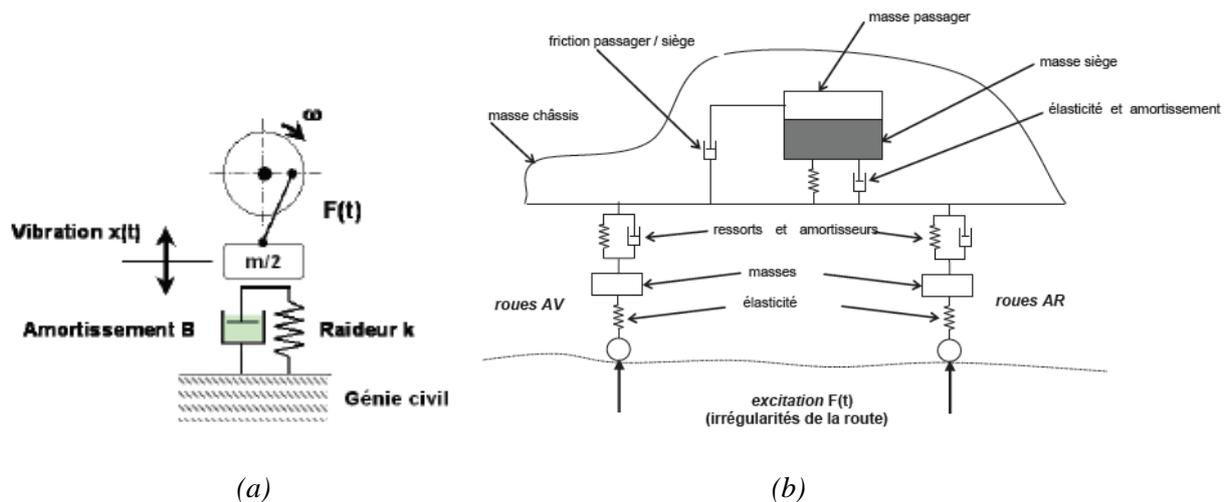
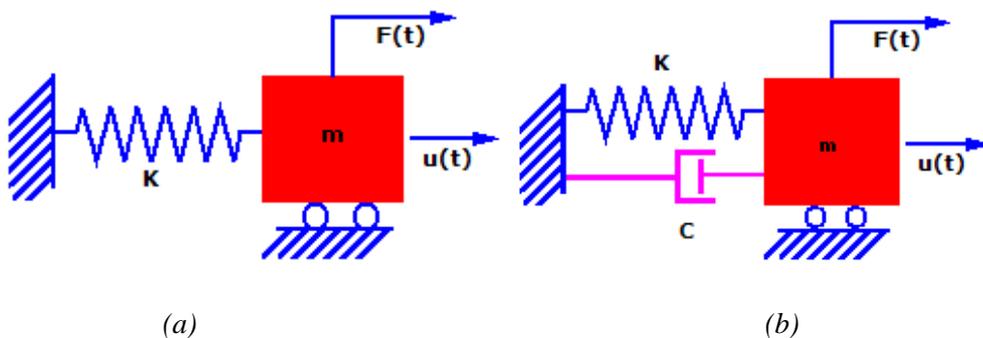


Figure 2.2 : Modélisation d'un système mécanique : (a) rotor déséquilibré (un degré de liberté), (b) Modélisation d'un véhicule automobile [RAZ, 2010].

## 2.4 Équation de mouvement

Pour un système linéaire, en l'absence de force excitatrice extérieure, la position est déterminée à partir d'un système d'équations différentielles linéaires à coefficients constants sans second membre. C'est le cas habituel dans l'hypothèse de faibles déplacements.

Un modèle élémentaire permettant de définir les principaux caractères des phénomènes vibratoires est le système solide-ressort. Il est présenté sur la Figure (2.3a). La masse ( $m$ ) est soumise à une force  $F(t)$  dans la direction  $u$ , comme fonction du temps. La masse peut seulement se déplacer dans la direction  $u$ , et il s'agit donc d'un système à un seul degré de liberté (1-DDL). Un ressort de raideur ( $k$ ) s'oppose au mouvement.



**Figure 2.3 :** Système mécanique à 1-DDL avec une excitation à la base, (a) masse-ressort, (b) masse-ressort-amortisseur.

L'équation du mouvement est obtenue en appliquant la seconde loi de Newton (la force est égale à la masse multipliée par l'accélération) pour ce système au moment ( $t$ ) aboutit à :

$$\sum F_{ext} = F_{inertie} \quad (2.1)$$

$F_{inertie}$  est la force d'inertie, elle est proportionnelle à la dérivée seconde du déplacement par rapport au temps, soit l'accélération  $\ddot{u}(t)$  :

$$F_{inertie} = m\ddot{u}(t) \quad (2.2)$$

Le bilan des forces extérieures appliquées sur la masse se dresse comme suit: la force excitatrice et la force de rappel du ressort. La forme scalaire de l'équation (2.2) est ainsi déduite :

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = F(t) \quad (2.3)$$

$k$  : Raideur du système

En pratique, les structures présentent toujours un amortissement non-nul. L'amortissement est souvent modélisé par un amortisseur visqueux (Figure 2.3b), ce qui est mathématiquement convenable pour la résolution de l'équation du mouvement. L'équation prend la forme suivante :

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t) \quad (2.4)$$

Où :  $\dot{u}(t)$  est la vitesse de la masse au moment ( $t$ ) et est égal à la première dérivée de  $u$  par rapport au temps,  $\ddot{u}(t)$  étant l'accélération,  $c$  représente l'amortissement et  $k$  la raideur.

## 2.5 Théorie de l'analyse statique

Dans l'analyse statique linéaire, les chargements sont appliqués lentement et progressivement jusqu'à l'intensité désirée. Une fois cette intensité atteinte, les chargements restent constants dans le temps. Les accélérations et vitesses du système excité sont négligeables; par conséquent, aucune force d'inertie ou d'amortissement n'est prise en compte dans la formule:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (2.6)$$

Les déplacements en tous points du milieu continu sont alors déduits du vecteur  $\{u(t)\}$  et des fonctions de forme. Les tenseurs de déformations et de contraintes en tous points en découlent également grâce aux lois de comportement des matériaux.

### 2.5.1 Loi de comportement des matériaux

La loi de comportement élastique relie le tenseur des contraintes au tenseur de déformations. En élasticité linéaire, la relation contrainte déformation pour le matériau est donnée par la loi généralisée de Hooke telle que [CRA, 2008] :

$$\{\sigma\} = H\{\varepsilon\} \quad (2.7)$$

Les contraintes varient proportionnellement à la déformation. Les déformations doivent être suffisamment petites de manière à rester dans la partie linéaire de la loi constitutive et présenter le même comportement en traction et en compression. La loi reliant les déplacements aux déformations est également linéaire : on se place donc dans le cadre de la mécanique linéaire. Le tenseur des contraintes, symétrique, est entièrement déterminé en tout point par la connaissance de six composantes sur les neuf, que l'on représente vectoriellement

### 2.5.2 Le critère de la contrainte maximale de Von Mises

Le critère de Von Mises (1913) est basé sur la théorie de Von Mises-Hencky, connue aussi sous le nom de théorie de l'énergie de distorsion maximale. Selon l'hypothèse de Von Mises, l'écoulement de la matière se produit lorsque l'énergie de distorsion atteint une valeur critique. La mise en place du critère est basée sur le fait qu'un volume donné de matériau ne peut absorber qu'une quantité limitée d'énergie élastique. Explicité dans le repère principal des contraintes, la contrainte équivalente au sens de Von Mises s'écrit [COS, 2008]:

$$\sigma_{Von\ Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2} \quad (2.8)$$

Où  $\sigma_I$ ,  $\sigma_{II}$  et  $\sigma_{III}$  sont les contraintes principales. Le comportement est élastique si la contrainte équivalente est inférieure à la limite élastique du matériau. C'est le critère le plus utilisé dans le monde industriel pour les structures en matériaux métalliques. Une représentation graphique de ce critère pour l'état plan de contrainte est une ellipse qui englobe le critère de Tresca (Figure 2.4). L'écart maximal entre ces deux critères est d'environ 15% pour un cisaillement pur [CRA, 2008].

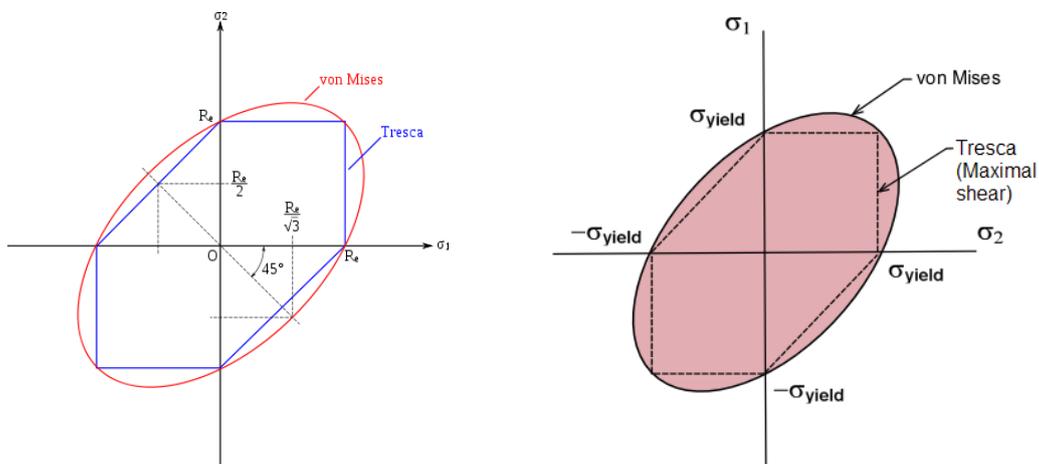


Figure 2.4 : Critères de Tresca et de Von Mises [CRA, 2008].

### 2.5.3 Coefficient de sécurité

Pour les études statiques, l'Assistant Coefficient (facteur) de sécurité vous guide pas à pas pour déterminer la sécurité de notre conception sur la base du critère de ruine choisi. Il calcule la distribution du coefficient de sécurité à travers l'ensemble du modèle, sur la base des critères suivants : critère de Von Mises maximal, critère du cisaillement maximal, critère de Mohr-Coulomb et critère de contrainte normale maximale. Le coefficient de sécurité du matériau est défini sous la forme :

$$CS = \sigma_e / \sigma_{\text{vonMises}} \quad (2.9)$$

Où  $\sigma_e$  est la limite élastique.

## 2.6 Vibration libres (analyse modale)

### 2.6.1 Vibrations libres sans amortissement

L'équation (2.3) devient :

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (2.10)$$

Le terme de droite de l'équation (2.10) est nul lorsqu'il n'y a pas de sollicitations externes. Quand on déplace la masse d'un déplacement initial  $u_0$ , la masse se met à vibrer autour de sa position d'équilibre initiale.

La solution de l'équation différentielle (2.10) est de la forme suivante :

$$u = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t \quad (2.11)$$

Avec  $\omega_0$  la pulsation propre,  $A$ ,  $B$  sont des constantes que l'on peut définir à partir des conditions initiales du déplacement  $u_0$  et de la vitesse  $v_0$  :

$$t = 0 \Rightarrow u(t = 0) = u_0 \Rightarrow A = u_0$$

$$\dot{u}(t = 0) = v_0 \Rightarrow B = v_0 / \omega_0$$

Si l'on considère que la vitesse initiale est nulle, cela annule la constante  $B$  et le déplacement et ses dérivées s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} u(t) = A \cos \omega_0 t \\ \dot{u}(t) = -A \omega_0 \sin \omega_0 t \\ \ddot{u}(t) = -A \omega_0^2 \cos \omega_0 t \end{cases} \quad (2.12)$$

En substituant dans l'équation (2.10), on obtient l'équation suivante :

$$(-\omega_0^2 m + k) A \cos \omega_0 t = 0 \quad (2.13)$$

Cela implique que pour vérifier l'équation précédente, le premier terme de l'équation (2.13) s'annule, soit :

$$(-\omega_0^2 m + k) = 0 \quad (2.14)$$

D'où :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.15)$$

Cette dernière formule montre que la pulsation propre  $\omega_0$  ne dépend ni des conditions initiales ni des sollicitations externes. Elle est propre à la structure et exprimée en rad/sec. On peut en déduire la fréquence propre  $f$  de la structure, exprimée en  $Hz$  :

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{T} \quad (2.16)$$

$T$  est la période propre de la structure exprimée en *seconde*.

### 2.6.2 Vibrations libres avec amortissement

L'équation (2.4) devient :

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (2.13)$$

L'équation (2.13) après une division par la masse s'écrit :

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega_0\dot{u}(t) + \omega_0^2u(t) = 0 \quad (2.14)$$

Où  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  et  $\xi$  représente le coefficient d'amortissement, soit :

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_0} \quad (2.15)$$

La quantité  $2m\omega_0$  est appelé l'amortissement critique  $c_{cr}$ . Elle dépend de la raideur et de la masse de la structure, soit :

$$c_{cr} = 2m\omega_0 = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{\omega_0}$$

La solution générale de l'équation (2.14) est de la forme suivante :

$$u(t) = e^{-\xi\omega_0 t} (C \cos \omega_D t + D \sin \omega_D t) \quad (2.16)$$

Où  $C$  et  $D$  sont des constantes que l'on peut définir à partir des conditions initiales suivantes :

$$t = 0 \Rightarrow u(t = 0) = u_0 \Rightarrow C = u_0$$

$$\dot{u}(t = 0) = v_0 \Rightarrow D = \frac{v_0 + \xi\omega_0 u_0}{\omega_D}$$

$\omega_D$  est la pulsation amortie de la structure. Elle est liée à la pulsation propre de la structure non amortie par la relation suivante :

$$\omega_D = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.17)$$

Avec un amortissement inférieur à 5%, les deux fréquences sont presque égales.

**Tableau 2.1 :** Coefficients d'amortissement structurel selon le type de matériau constitutif.

Matériau	$\xi$
Acier soudé	0.1%-0.5%
Acier boulonné	0.5%-1%
Béton	1%-2%
Bois	2%-5%

La réponse de la structure  $u$  peut être décrite avec la formule :

$$u(t) = e^{-\xi\omega_0 t} \left( u_0 \cos \omega_0 t + \frac{v_0 + \xi\omega_0 u_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \quad (2.18)$$

## 2.7 Vibrations forcées

### 2.7.1 Vibrations forcées sans amortissement

L'oscillateur sera maintenant sollicité par une force externe harmonique de la forme suivante :

$$F(t) = f_0 \sin \bar{\omega} t \quad (2.19)$$

$f_0$  est son amplitude maximale,  $\bar{\omega}$  est sa pulsation en *rad/sec*.

L'équation (2.3) devient :

$$m\ddot{q} + kq = f_0 \sin \bar{\omega} t \quad (2.20)$$

La solution particulière de l'équation différentielle précédente s'écrit alors :

$$u_f = \frac{f_0}{k} \frac{1}{1 - (\bar{\omega}/\omega_0)^2} \sin \bar{\omega} t \quad (2.21)$$

Et la solution complémentaire :

$$u_c(t) = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t \quad (2.22)$$

Les constantes  $A$  et  $B$  se déterminent à partir des conditions initiales  $u_0$  et  $v_0$  et l'expression finale déplacement est :

$$u(t) = \underbrace{u_0 \cos \omega_0 t + \left( \frac{v_0}{\omega_0} - \frac{f_0}{k} \frac{\bar{\omega}/\omega_0}{1 - (\bar{\omega}/\omega_0)^2} \right) \sin \omega_0 t}_{\text{Transitoire}} + \underbrace{\frac{f_0}{k} \frac{\bar{\omega}/\omega_0}{1 - (\bar{\omega}/\omega_0)^2} \sin \bar{\omega} t}_{\text{Permanent}} \quad (2.23)$$

Le premier terme dépend des conditions initiales. Il est appelé transitoire, mais il possède une valeur non-nulle même pour un déplacement initial et une vitesse initiale nuls. Le nom transitoire vient du fait que cette réponse décroît avec le temps à cause de la présence d'amortissement, lorsque le système est amorti. Le deuxième terme possède une valeur non-nulle tant que la sollicitation existe. Il est appelé permanent. L'équation (2.23) montre que lorsque  $\omega_0 = \bar{\omega}$ , l'amplitude  $u$  tend vers l'infini : on dit que la structure est en résonance avec la sollicitation. En se focalisant sur ce dernier terme, on peut l'écrire de la manière suivante :

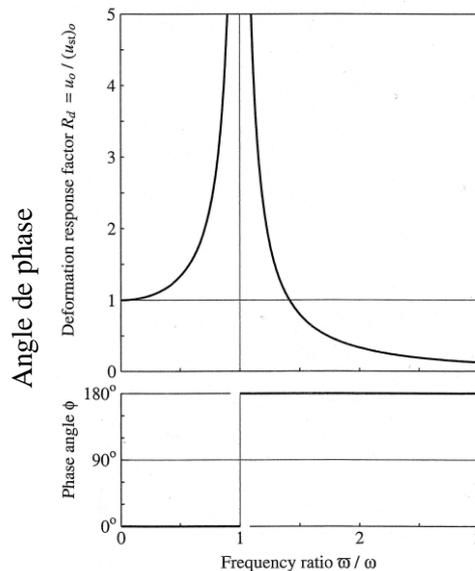
$$\begin{aligned} u_f(t) &= (u_{st})_0 \frac{1}{1 - (\bar{\omega}/\omega_0)^2} \sin \bar{\omega}t \\ (u_{st})_0 &= \frac{f_0}{k} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Où  $(u_{st})_0$  est le déplacement statique.

Le terme  $\frac{1}{1 - (\bar{\omega}/\omega_0)^2}$  est supérieur à zéro lorsque  $\bar{\omega} < \omega_0$  ce qui signifie que la structure et la sollicitation vibrent en phase. Dans le cas contraire  $\bar{\omega} > \omega_0$ , il est inférieur à zéro : la structure et la sollicitation vibrent en opposition de phase. Cette notion est illustrée graphiquement sur la Figure (2.5) et mathématiquement dans les formules (2.25).

$$\begin{aligned} u &= u_0 \sin(\bar{\omega} - \phi) = (u_{st})_0 R_d \sin(\bar{\omega} - \phi) \\ u &= (u_{st})_0 \frac{1}{|1 - (\bar{\omega}/\omega_0)^2|} \sin(\bar{\omega} - \phi) \\ R_d &= \frac{1}{|1 - (\bar{\omega}/\omega_0)^2|} \end{aligned} \quad (2.25)$$

où  $R_d$  est le facteur d'amplification du déplacement.



Taux de fréquence (vitesse spécifique)  
**Figure 2.5 : Facteur d'amplification et phase [CHO, 2007].**

### 2.7.2 Vibrations forcées avec amortissement

L'équation du mouvement d'une structure excitée par une force externe harmonique et qui présente de l'amortissement devient :

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = f_0 \sin \bar{\omega} t \quad (2.27)$$

La solution particulière de cette équation est de la forme :

$$u_f(t) = C \sin \bar{\omega} t + D \cos \bar{\omega} t \quad (2.28)$$

Les constantes  $C$  et  $D$  sont définies par :

$$\begin{cases} C = \frac{f_0}{k} \frac{1 - (\bar{\omega}/\omega_0)^2}{[1 - (\bar{\omega}/\omega_0)^2]^2 + [2\xi(\bar{\omega}/\omega_0)]^2} \\ D = \frac{f_0}{k} \frac{-2\xi\bar{\omega}/\omega_0}{[1 - (\bar{\omega}/\omega_0)^2]^2 + [2\xi(\bar{\omega}/\omega_0)]^2} \end{cases} \quad (2.29)$$

La solution complémentaire est de la forme :

$$u_c(t) = e^{-\xi\omega_0 t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t) \quad (2.30)$$

Où  $A$  et  $B$  se déterminent à partir des conditions initiales de déplacement  $u_0$  et de vitesse  $v_0$ .

La solution totale de l'équation comprendra deux parties : une partie transitoire et une partie permanente :

$$u(t) = \underbrace{e^{-\xi\omega_0 t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t)}_{\text{Transitoire}} + \underbrace{C \sin \omega_D t + D \cos \omega_D t}_{\text{Permanent}} \quad (2.31)$$

L'amortissement fait bien décroître la composante transitoire du déplacement au cours du temps. On voit Figure (2.6) comment la réponse totale tend vers la réponse permanente car la partie transitoire est annulée à cause de l'amortissement. Il faut noter que le pic du mouvement a lieu avant que le système atteigne la partie permanente. L'importance de l'amortissement est remarquable dans la résonance, où la fréquence de la sollicitation s'approche ou égale la fréquence propre de la structure.

La solution de l'équation (2.28) représentant la partie permanente peut être écrite en termes de phase et par un facteur d'amplification du déplacement de la manière suivante :

$$u(t) = u_0 \sin (\bar{\omega} t - \phi) = (u_{st})_0 R_d \sin (\bar{\omega} t - \phi) \quad (2.32)$$

Avec :

$$R_d = \frac{u_0}{(q_{st})_0} = \frac{1}{\sqrt{[1-(\bar{\omega}/\omega_0)^2]^2 + [2\xi(\bar{\omega}/\omega_0)]^2}} \quad (2.33)$$

$$\frac{u}{u_g} = \frac{1}{\sqrt{[1-(f/f_0)^2]^2 + [2\xi(f/f_0)]^2}} \quad (2.34)$$

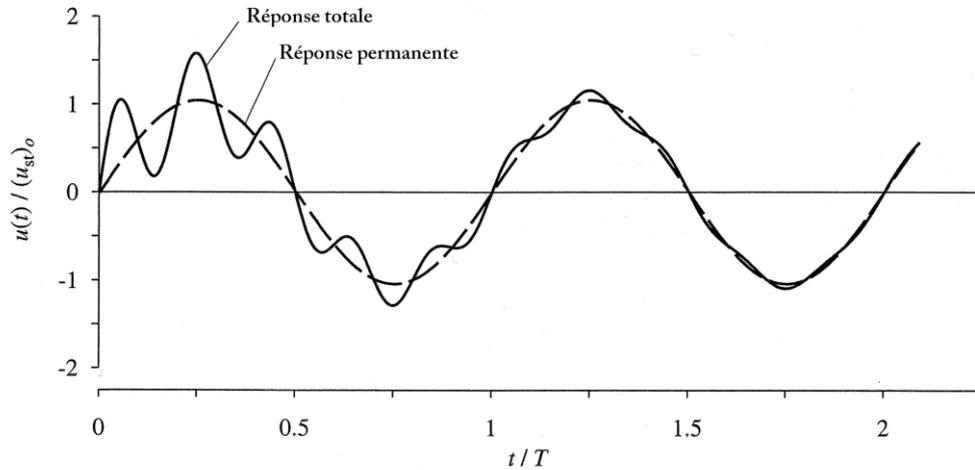


Figure 2.6 : Réponse d'un système amorti à une force externe harmonique,  $\bar{\omega}/\omega_0 = 0.2, \xi = 0.05, u_0 = 0$  et  $v_0 = \omega_0 f_0/k$  [CHO, 2007].

$$\phi = \arctan \frac{2\xi(\bar{\omega}/\omega_0)}{1-(\bar{\omega}/\omega_0)^2} \quad (2.35)$$

La représentation graphique des deux termes précédents est illustrée dans la Figure (2.6).

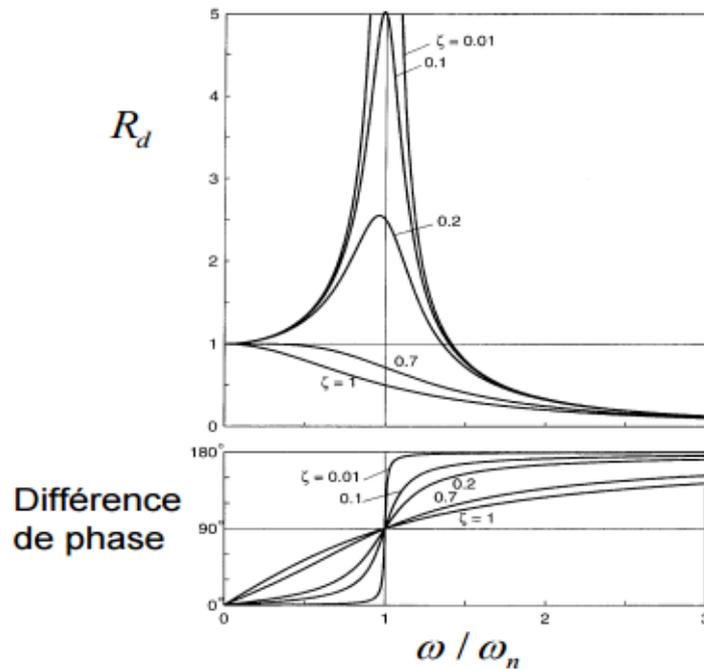


Figure 2.7 : Variation du facteur d'amplification et du déphasage pour différents coefficients d'amortissement [COO, 1985].

On voit sur la Figure (2.7) que la résonance n'est pas maximum quand  $\bar{\omega} = \omega_D$  mais quand  $\bar{\omega} = \omega_0 \sqrt{1 - 2\xi^2}$ . Elles peuvent être confondues pour les petites valeurs d'amortissement. On voit aussi qu'il n'y a pas de pics dans les courbes correspondant à des amortissements supérieurs à  $1/\sqrt{2}$ . Le facteur d'amplification correspondant à la fréquence de résonance s'écrit comme suit :

$$R_d(\bar{\omega}/\omega_0) = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.36)$$

En regardant l'équation (2.36), on trouve que le maximum du déplacement à la résonance est directement lié à l'amortissement et qu'il ne dépasse pas  $\frac{1}{2\xi}$ .

## 2.8 Système à plusieurs degrés de liberté (N-DDL)

Après discrétisation du problème mécanique, de manière analogue par exemple à la MEF en statique, nous pouvons construire les matrices de masse  $[M]$ , d'amortissement visqueux  $[C]$ , de raideur  $[K]$  et le vecteur des efforts extérieurs  $F(t)$ . L'équation du mouvement sous forme matricielle peut se mettre sous la forme [GER, 1978] :

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t)\} \quad (2.37)$$

Où :  $\{u(t)\}$ ,  $\{\dot{u}(t)\}$  et  $\{\ddot{u}(t)\}$  sont les vecteurs des déplacements, des vitesses et des accélérations (composants d'accélération de chaque nœud) et  $\{F(t)\}$  vecteur de chargement variable dans le temps (composants de force de chaque nœud).

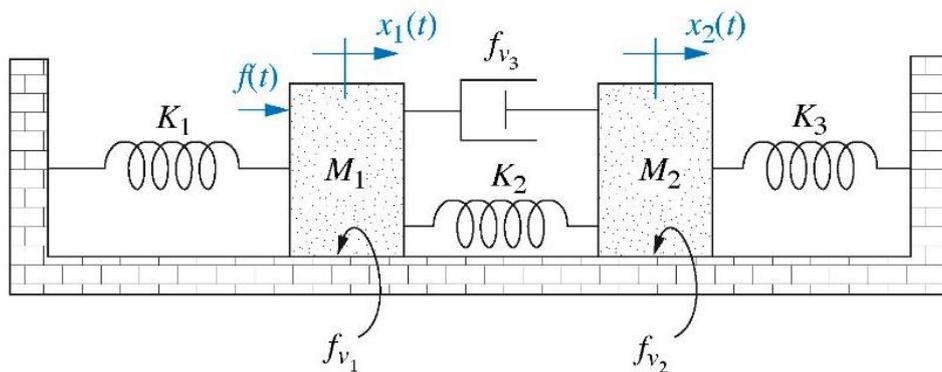
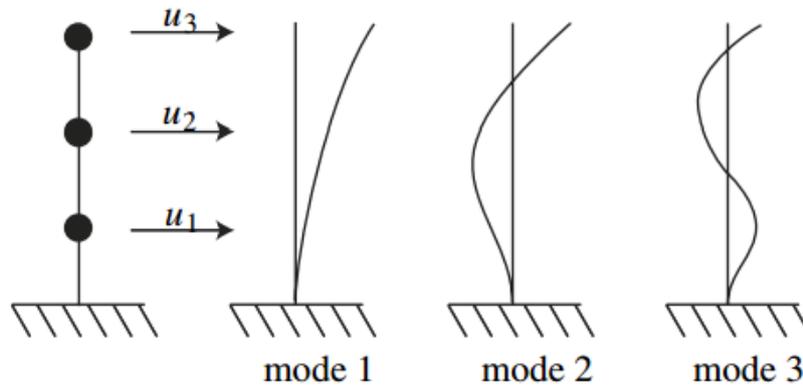


Figure 2.8 : Exemple de système mécanique à deux degrés de liberté 2-DDL.

### 2.8.1 Signification des modes propres et fréquences propres

Nous supposons un système discret, conservatif ( $c = 0$ ) et sans chargement extérieur (Equation 2.10). Prenons l'exemple d'un bâtiment de trois étages. Concentrons la masse au niveau des planchers, nous obtenons ainsi un système à 3-DDL dynamique. Soumis à un

chargement quelconque, le mouvement horizontal de chaque plancher n'est plus harmonique. Par contre, si la vibration libre de la structure est initiée par des vitesses et des déplacements appropriés imposés aux masses, la structure oscillera suivant un mouvement harmonique simple. Trois allures caractéristiques de la déformée existent pour un système à 3-DDL. Ce sont les modes propres de vibration.



*Figure 2.9 : Modes propres d'un bâtiment de trois étages.*

À chaque mode nous pouvons associer une fréquence propre de vibration :

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (2.38)$$

Avec :  $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 \dots < \omega_n$

Le vecteur  $\phi_n$  définit l'allure de la déformée de la structure répondant à la pulsation propre  $\omega_n$ .  $\phi_n$  définit seulement le rapport des déplacements des planchers entre eux ( $u_1/u_2, u_1/u_3$ ).

### 2.8.2 Détermination des fréquences propres de vibration

La réponse d'un mode propre est harmonique, ainsi le vecteur des déplacements peut s'écrire :

$$\hat{u}(t) = u_0 \sin(\bar{\omega}(t) + \theta) \quad (2.39)$$

$\hat{u}$  représente les modes de déformations possibles qui ne changent pas avec le temps (seule l'amplitude varie). L'analyse du système nous montre qu'une solution n'est possible que si :

$$\det(M^{-1}K - \bar{\omega}^2 I) \quad (2.40)$$

C'est l'équation aux fréquences du système. En développant le déterminant, nous obtenons une équation polynomiale de degré  $N$  en  $\omega^2$ . Les  $N$  racines sont les fréquences propres des  $N$  modes de vibration du système ( $\omega_1^2, \omega_2^2, \omega_3^2, \dots, \omega_N^2$ ).

### 2.8.3 Détermination des modes propres de vibration

Pour compléter le problème aux valeurs propres, on peut calculer les  $n$  formes de vibrations correspondant aux  $n$  modes de vibration. Si nous remplaçons les valeurs de  $\omega_n$  :

$$[K - \bar{\omega}_n^2 M](\hat{u}_n) = 0 \quad (2.41)$$

L'ensemble des vecteurs modaux de vibration propre peuvent être mise sous forme matricielle :

$$[\phi] = [\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \dots \ \dots \ \phi_N] \quad (2.41.a)$$

### 2.8.4 Propriété d'orthogonalité et normalisation des vecteurs modes

Si  $\bar{\omega}_n \neq \bar{\omega}_m$  alors

$$\phi_m^T K \phi_n = 0$$

Et (2.42)

$$\phi_m^T M \phi_n = 0$$

Les vecteurs modes de vibration sont dits orthogonaux par rapport aux matrices  $M$  et  $K$ . ainsi la matrice  $[\phi_m^T] M [\phi] = [\hat{M}]$  est diagonale et

$$[\phi_n^T] M [\phi_n] = \hat{M}_n \quad (2.43)$$

est appelée masse généralisée du mode  $n$ . De façon analogue pour la matrice de raideur, nous pouvons définir la matrice de raideur généralisée  $[\hat{K}]$  par :

$$[\phi_n^T] K [\phi_n] = \hat{K}_n \quad (2.44)$$

Il est avantageux de normaliser  $u_n$  de façon à obtenir :

$$\phi_n^T M \phi_n = 1 \quad (2.45)$$

Ainsi, si  $\phi_n = \frac{1}{\hat{M}_n^{1/2}}$  alors  $[\phi^T] M [\phi] = I$ .

**Partie II**  
**CONCEPTION & SIMULATION**  
**PAR MEF**

# Chapitre

# Conception Assisté par Ordinateur DAO/CAO de Deux Systèmes de Suiveur Solaire

# 3

---

## Sommaire

<b>3.1</b>	<b>Conception Assisté par Ordinateur (CAO)</b> .....	<b>40</b>
3.1.1	Introduction et historique de la CAO .....	40
3.1.2	Définition de la CAO .....	41
3.1.3	Outil CAO utilisé dans la thèse .....	42
3.1.4	Motivations du choix du logiciel SOLIDWORKS® .....	42
3.1.5	Modélisation géométrique en CAO .....	46
<b>3.2</b>	<b>Conception et modélisation géométrique de système MS-2 TRACKER 10+ et le nouveau prototype du système de suiveur solaire</b> .....	<b>47</b>
3.2.1	Description générale des systèmes .....	47
3.2.2	Système de poursuite .....	49
3.2.3	Structure des systèmes .....	51
<b>3.3</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>61</b>

---

## Résumé

La conception assistée par ordinateur **CAO** est devenue un outil technologique puissant dans l'ingénierie moderne complexe et multidisciplinaire. Le travail présenté dans ce chapitre a pour objectif la conception et la modélisation géométrique détaillé à l'échelle réelle (l'esquisse de tous les composants, l'assemblage, la vérification et la simulation d'animation) de structures de deux SSS2 (MS-2 & NSSS2). Cette conception a été réalisée par le logiciel de **D.A.O & C.A.O SOLIDWORKS®**.



## 3.1 Conception Assisté par Ordinateur (CAO)

### 3.1.1 Introduction et historique de la CAO

Les premiers travaux consacrés à la réalisation des formes compliquées furent probablement accomplis, après 1942, en commun par IBM et Bendix-Aviation pour l'usinage de prototypes de camoïde et d'ailettes de turbines à gaz. Ensuite, vers 1955, les programmes APT réalisaient le détournage bidimensionnel de profils constitués presque exclusivement de segments de droite et d'arcs de cercle [BEZ, 1986].

À l'exception des recherches accomplies dans l'industrie aéronautique aux USA, la plupart des premiers travaux sur la CAO visaient à fournir aux concepteurs et aux ingénieurs le moyen de tracer des objets mécaniques conçus selon une méthode extrêmement traditionnelle, à l'aide de la règle et du compas [LAC, 1987]. Les débuts véritables de la CAO se sont faits dans les années 60 et consistaient essentiellement à informatiser la planche à dessin traditionnelle. On ne parlait pas encore de CAO, mais de DAO. Dans les années 70 et 80, le DAO a ainsi permis aux entreprises d'entamer le processus d'informatisation de leurs méthodes de dessin 2D. Parmi les logiciels ayant servi à cet effet, on peut citer AutoCAD de la société Autodesk. Les années 90 ont vu l'essor des modélisations volumiques et solides (3D). On est passé ainsi du DAO à la CAO. Parmi les logiciels commerciaux ayant servis à cet effet, on peut citer Euclid, Catia, Pro/Engineer, SOLIDWORKS, etc. depuis les années 2000, plusieurs chercheurs [PIE, 2005 ; XU, 2005 ; MEN, 2003 ; MUN, 2003 & SIU, 2001] se sont penchés sur l'étude de l'utilisation de la CAO en conception. Nous pouvons distinguer plusieurs générations de systèmes de CAO (Figure 3.1) qui peuvent être classifiées, d'un point de vue historique, selon [DI, 2010], de la manière suivante:

- le Dessin Assisté par Ordinateur (DAO): les objets sont représentés par la projection de leurs arêtes sur un plan bidimensionnel 2D.
- la représentation dite fil de fer (Wireframe): les objets sont représentés par ses arêtes mais dans l'espace tridimensionnel 3D.
- la représentation des objets par leurs frontières surfaciques B-REP (*Boundary Representation*).
- la représentation par l'espace tridimensionnel occupé par l'objet, cette génération est appelée la technique de «*Constructive Solid Geometry*» (CSG) ou l'arborescence de construction.

La CAO garde une place centrale en conception mécanique. Loin de supporter seulement les représentations de la conception, elle sert à décrire, manipuler, analyser, simuler ou optimiser numériquement les multiples représentations de l'objet à concevoir ou en cours de conception.

### 3.1.2 Définition de la CAO

Nous pouvons définir la CAO par l'ensemble des outils logiciels et des techniques informatiques qui permettent d'assister les concepteurs dans la conception et la mise au point d'un produit. Un logiciel de CAO se compose généralement de quatre parties majeures qui peuvent être organisées comme suit [KER, 2003]:

- **Le modelleur géométrique:** il représente "la planche à dessin". Nous trouvons dans cette partie les composants géométriques essentiels: points, droites, cercles, ellipses, plans, sphères, cylindres, cônes, courbes de Bézier ou B-Splines, surfaces NURBS, surfaces de révolution, surfaces de balayage, etc. Il intègre également les composants topologiques: sommets, faces, arêtes, orientations, coïncidences, adjacences, intersections, soustractions, unions, etc.
- **L'outil de visualisation.**
- **Un certain nombre d'applications:** nous retrouvons le calcul des grandeurs géométriques (distances, inerties, volumes, masses, etc.), les fonctions métiers: assemblage de pièces, production de plans, simulation d'usinage, moulage, fraisage, etc.
- **Un contrôleur:** il gère et manipule les intersections entre les trois outils cités précédemment.

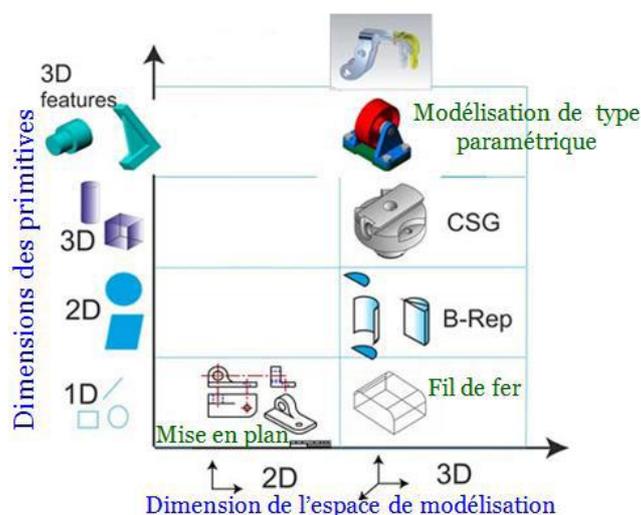


Figure 3.1 : Le diagramme représentant les cinq générations de systèmes de CAO [DI, 2010].

### 3.1.3 Outil CAO utilisé dans la thèse

Dans ce travail de thèse nous avons choisi le logiciel CAO-SOLIDWORKS® [DUD, 2009 & ALY, 2005] pour développer la conception et la modélisation géométrique du NSSS2 proposée et le système de MS-2.

SOLIDWORKS® est un logiciel 3D Mécanique Conception Assistée par Ordinateur (MCAO) développé par SOLIDWORKS® Corporation des États-Unis. SOLIDWORKS® Corporation a été fondé en décembre 1993 par Jon Hirschtick. En juillet 1997, DASSAULT SYSTEM rachète la société qui est détentrice de la licence du produit et l'intègre dans l'univers DASSAULT. SOLIDWORKS® est un logiciel commercial largement utilisé dans la modélisation et dans la conception des systèmes mécaniques assistée par ordinateur [DIA, 2009].

### 3.1.4 Motivations du choix du logiciel SOLIDWORKS®

SOLIDWORKS® est basé sur la définition paramétrique des composants et fonctionnalités et peut être utilisé d'une manière très intuitive [SON, 2009]. Contrairement à d'autres outils de modélisation 3D, SOLIDWORKS® n'est pas entièrement en trois dimensions, qui est, on dessine dans un plan et ensuite extrude solides par rapport au plan qui est utilisé pour obtenir la position dans l'espace 3D. SOLIDWORKS® est une fonction très innovante qui permet la conception facile des pièces complexes. Il accepte les formats IGES, DXF, STEP, DWG, ASC et les autres normes de données et peuvent facilement intégrer presque tous les logiciels mécanique de CAO dans l'environnement de conception. Actuellement, SOLIDWORKS® est devenu le logiciel principal de conception 3D de la plateforme PC [DEV, 2003 & LIA, 2011]. Par rapport à CAO traditionnelle, SOLIDWORKS® peut modifier et compléter les pièces physiques dans l'environnement des assemblages, où la fonction montage intelligent permet de modifier et d'ajuster automatiquement une pièce à l'emplacement approprié pour améliorer l'efficacité de conception. Ainsi, SOLIDWORKS® semble le plus puissant que les autres logiciels commerciaux lors de la conception d'assemblages à grande échelle portant sur plus de dix mille éléments. En outre, SOLIDWORKS® a beaucoup d'autres outils qui rendent la vie des ingénieurs et des chercheurs concepteurs très simple. Par conséquent, la simulation visuelle dynamique peut être réalisée facilement avec SOLIDWORKS® [CHO, 2004 & TAO, 2012].

Tous ces avantages ont contribué et motivé le choix de ce logiciel pour modéliser géométriquement le NSSS2 et le système de MS-2. Ce logiciel couvre un très grand nombre

de domaines qui nécessitent beaucoup de précision. Nous pouvons mentionner par exemple les secteurs ou modules suivants:

**a) Modélisation d'assemblages :** Un assemblage est un ensemble de pièces connexes enregistrées dans un même fichier de document SOLIDWORKS® portant l'extension *.sldasm*.

Les assemblages :

- contiennent de deux composants à plus d'un millier. Ces derniers peuvent être des pièces ou d'autres assemblages, appelés sous-assemblages.
- affichent le mouvement entre des pièces connexes dans les limites de leurs degrés de liberté.

Les composants d'un assemblage sont définis les uns par rapport aux autres à l'aide de contraintes d'assemblage. Vous reliez les composants de l'assemblage en utilisant différents types de contraintes : coïncidentes, coaxiales, à distance, etc.

**b) Mise en plan :** Les mises en plan sont créées à partir de modèles de pièces ou d'assemblages. Les mises en plan sont disponibles dans plusieurs vues, telles que les 3 vues standard et les vues isométriques (3D). Nous pouvons importer les cotes du document de modèle et ajouter des annotations telles que des symboles de cible de référence. Nous créons des mises en plan à partir de fonds de plan. Chaque document de mise en plan renferme des feuilles de mise en plan contenant des vues de mises en plan. Les feuilles de mise en plan contiennent des fonds sous-jacents.

**c) Construction Mécano-soudées :** La fonctionnalité Construction soudée nous permet de concevoir une construction soudée en tant qu'une seule pièce à corps multiple. Nous utilisons des esquisses 2D et 3D pour définir la structure de base. Nous créons alors des éléments mécano-soudés contenant des groupes de segments d'esquisse. Nous pouvons également ajouter des goussets, des embouts, etc. à l'aide des outils de la barre d'outils constructions soudées.

**d) Conception de moules :** Nous créons un moule à l'aide d'une séquence d'outils intégrés qui contrôlent le processus de création de moules. Nous pouvons utiliser ces outils de moulage pour analyser et corriger les défauts dans les modèles SOLIDWORKS® ou les modèles importés de pièces à mouler. Les outils de moulage vont de l'analyse initiale à la création des volumes noyau/empreinte. La fonction volume noyau/empreinte crée une pièce à corps multiple contenant des corps séparés pour la pièce moulée, le noyau et l'empreinte, ainsi que

des corps optionnels tels que les noyaux latéraux. Le fichier de pièce à corps multiple renferme notre intention de conception. Les modifications apportées à la pièce moulée sont automatiquement reflétées dans l'outillage.

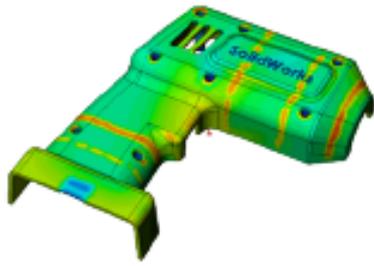
**e) SOLIDWORKS Routing :** Nous permet de créer un type de sous-assemblage particulier pour construire un routage de tuyauterie, de tubes ou de câbles électriques entre différents composants. Lorsque nous insérons certains composants dans un assemblage, un sous-assemblage de routage est automatiquement créé. A la différence des autres types de sous-assemblages, nous ne pouvons pas créer un assemblage de routage dans sa propre fenêtre, puis l'insérer en tant que composant dans l'assemblage de niveau supérieur. Un sous-assemblage de routage est composé de trois types d'entités :

- les composants, qui sont des accessoires et des connecteurs, notamment des brides, des téés, des connecteurs électriques et des attaches.
- des pièces de routage, notamment des tuyaux, des tubes, des fils et des câbles.
- une fonction Routage, qui inclut une esquisse 3D de la ligne de construction de la trajectoire.

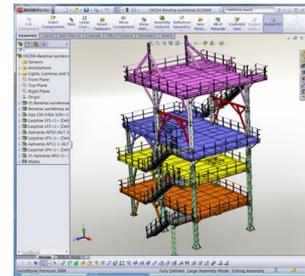
**f) Tôlerie :** Nous pouvons concevoir une pièce de tôlerie seule, sans aucune référence aux pièces qu'elle va inclure, la concevoir dans le contexte d'un assemblage contenant les composants joints, ou encore à l'intérieur d'un autre document de pièce dans le contexte d'un environnement à corps multiples.

**g) Conception de tuyaux/tubes :** générons et documentons des systèmes mécaniques en 3D, avec des chemins de tuyau/ tube, des manchettes et pentes de tuyau, et une nomenclature complète.

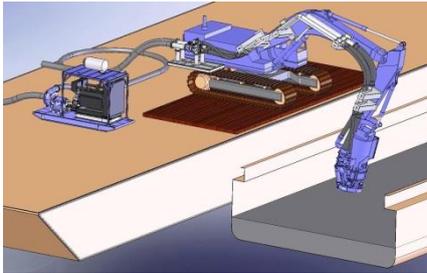
**h) Conception de câbles/harnais de câbles électriques et de conduits :** importons des informations relatives aux connexions électriques, générons et documentons des routages électriques en 3D et complétons la nomenclature de notre conception.



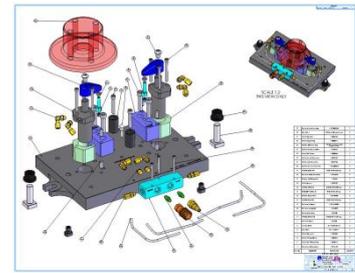
Modélisation de pièces



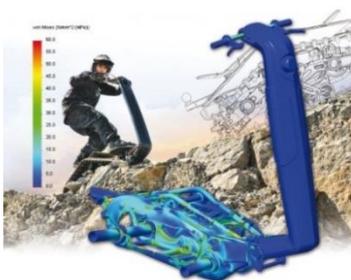
Constructions Mécano-soudées



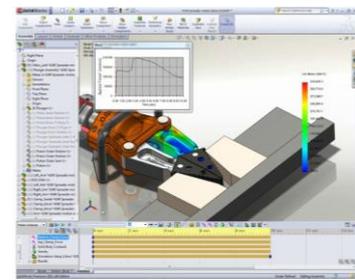
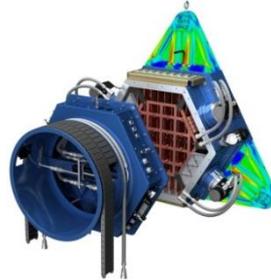
Modélisation d'assemblages



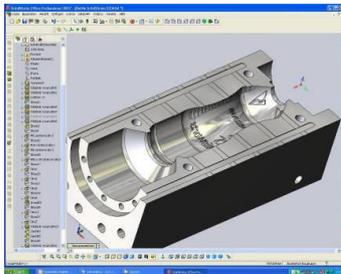
Mise en plan



SolidWorks Simulation (COSMOSWorks)



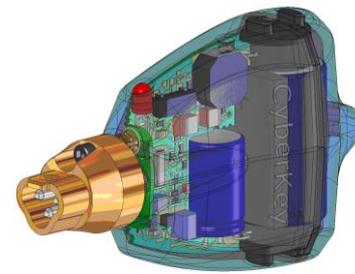
SolidMotion



Conception de moules



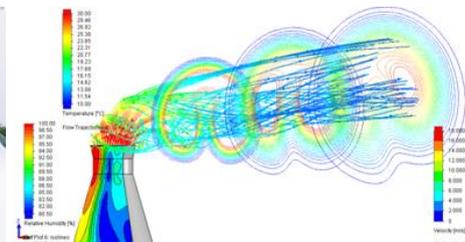
SolidWorks Routing



CircuitWorks



Computational Fluid Dynamic (CFD)



Conception durable (Sustainability)

Figure 3.2 : Quelques possibilités disponibles aux concepteurs via l'outil de CAO-SOLIDWORKS® [DAS, 2013].

### 3.1.5 Modélisation géométrique en CAO

Nous abordons dans ce paragraphe, de manière succincte, quelques notions fondamentales de la CAO. Nous nous focalisons sur les concepts mis en œuvre dans les approches géométriques proposées.

#### A. La modélisation 3D surfacique [KUA, 2006]

Le modèle surfacique représente l'objet par ses faces. Les surfaces permettent de créer des géométries complexes. Les propriétés physiques de l'objet (masse, centre de gravité, volume, inertie) ne sont pas connues. Le modèle surfacique est utilisé pour la modélisation des surfaces complexes. On peut construire une surface à partir des éléments filaire (point, droite...). Dans cette modélisation il y'a deux types de surfaces: les surfaces simples et les surfaces complexes.

Actuellement, presque tous les modeleurs géométriques utilisent un noyau surfacique destiné principalement à la définition géométrique de formes libres et complexes. Ce type de modélisation répond à de nombreux problèmes de l'industrie (carrosserie, aube de turbine, etc.).

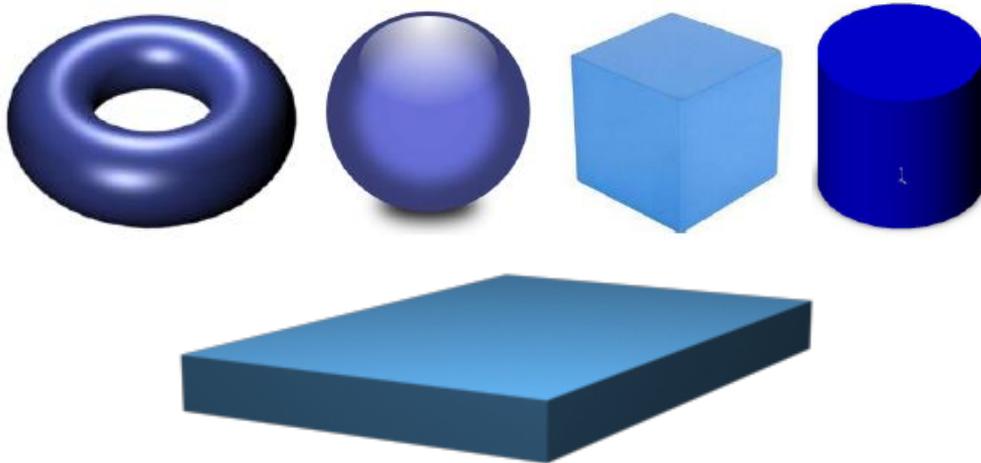
#### B. La modélisation 3D solide

Elle constitue la technique de représentation d'un objet la plus utilisée dans les modeleurs géométriques.

La technique de la représentation par frontière, ou « *Boundary Representation* » (BREP) est la technique de modélisation volumique la plus répandue. C'est une représentation qui s'apparente à la modélisation surfacique mentionnée précédemment. Elle consiste à définir le solide moyennant les surfaces frontières du solide. En d'autres termes, le solide est représenté comme une collection d'éléments surfaciques connectés entre eux. Les modèles créés par cette technique sont composés de deux parties essentielles [ALL, 2009], la topologie et la géométrie (surfaces, courbes, points). Les principaux éléments topologiques sont les suivants: faces, arêtes et sommets. Une face est une partie bornée (délimitée) d'une surface, une arête est un morceau borné d'une courbe, et un sommet est associé à un point.

Pour modéliser un solide, nous avons également la technique de modélisation CSG (*Constructive Solid Geometry*). La construction du modèle au moyen de la technique de l'« *Arbre de construction* » ou CSG consiste à utiliser un ensemble d'opérations booléennes (union, intersection, soustraction (différence)) qui sera appliqué sur des primitives

mathématiques telles que: la sphère, le cylindre, le cube, le tore, le cône, le parallélépipède (Figure 3.3).



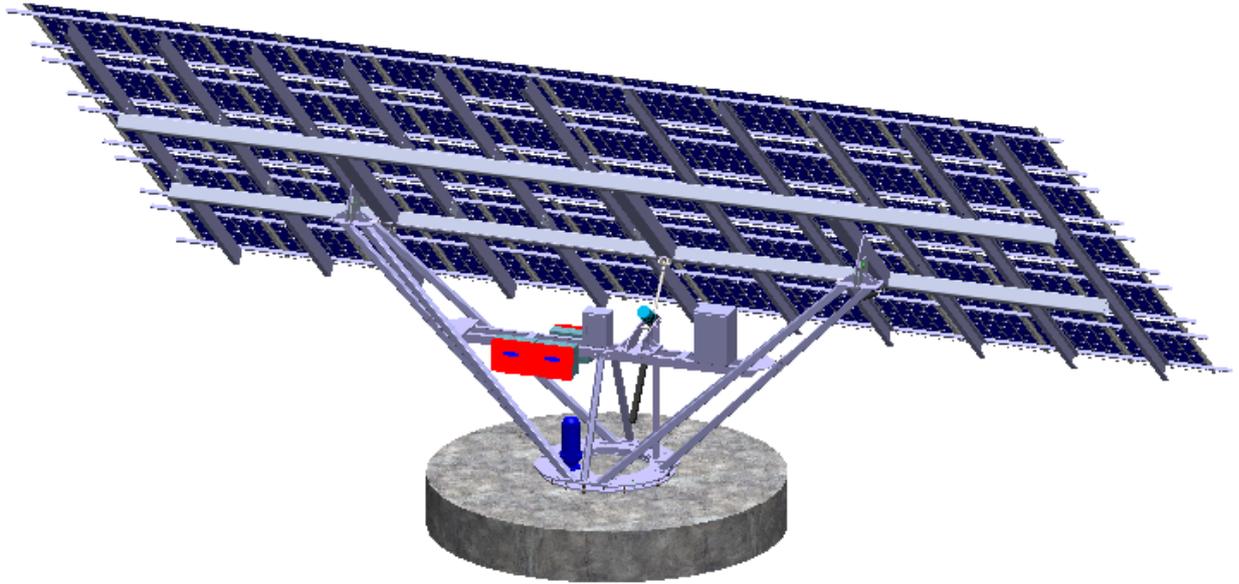
**Figure 3.3 :** Les primitives employées pour la création d'un solide via la technique CSG.

Cette technique de modélisation a évolué par la suite avec les logiciels de CAO vers l'arbre des caractéristiques qui contient l'historique de construction du produit. L'application des opérations booléennes sur les primitives permet aux concepteurs de créer des solides ayant des topologies plus complexes. B-REP et CSG sont les systèmes de représentation les plus largement utilisés dans les logiciels de CAO. Pour les différentes applications, l'une des deux techniques de modélisation peut être plus appropriée que l'autre. Par exemple, B-REP est plus approprié pour représenter des conceptions complexes, alors qu'avec la technique de modélisation CSG, les modèles sont faciles à créer. Dans certains modeleurs géométriques, tel que le logiciel SOLIDWORKS®, le système utilise en même temps B-REP et CSG.

## 3.2 Conception et Modélisation géométrique de système MS-2 TRACKER 10+ et le nouveau prototype du système de suiveur solaire

### 3.2.1 Description générale des systèmes

**Système de suiveur solaire de type MS-2 TRACKER 10+ [MEC, 2009] :** Le système de MS-2 (Figure 3.4 et Figure 3.5) est un dispositif électromécanique, il a deux degrés de liberté, permettant de suivre le trajet du soleil selon l'azimut ( $-120^\circ$  à  $+120^\circ$ ) et la hauteur (0 à  $60^\circ$ ), pour permettre une exposition maximale des modules PV au rayonnement solaire. Ainsi, ce système peut augmenter la collecte énergétique solaire de 35 à 45% par rapport à une orientation fixe.

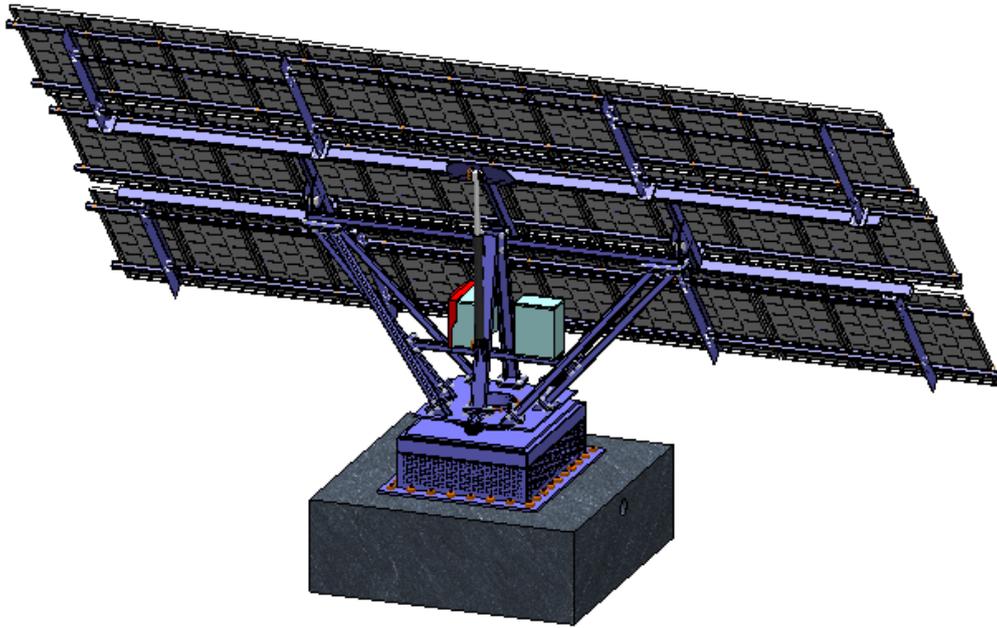


*Figure 3.4 : Le système de suiveur solaire MS-2 TRACKER 10+.*



*Figure 3.5 : Le suiveur MS-2 TRACKER 10+ sous l'installation dans la wilaya de Batna, Algérie.*

**Nouveau prototype du système de suiveur solaire :** Le NSSS2 (Figure 3.6) est un dispositif électrohydraulique. Permettant de suivre le trajet du soleil selon l'azimut ( $-120^\circ$  à  $+120^\circ$ ) et l'élévation (hauteur) ( $0$  à  $50^\circ$ ).

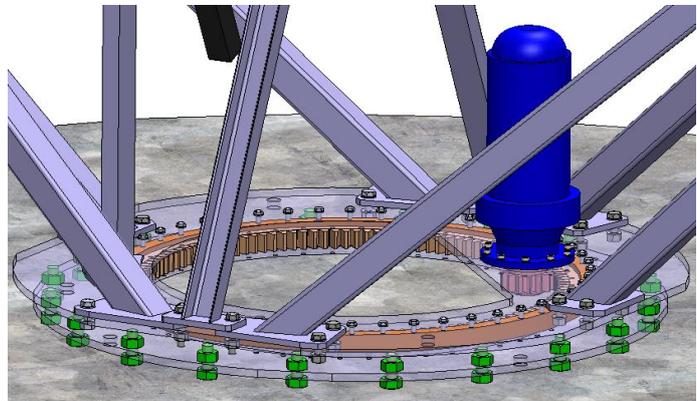


*Figure 3.6 : Le nouveau prototype du système de suiveur solaire.*

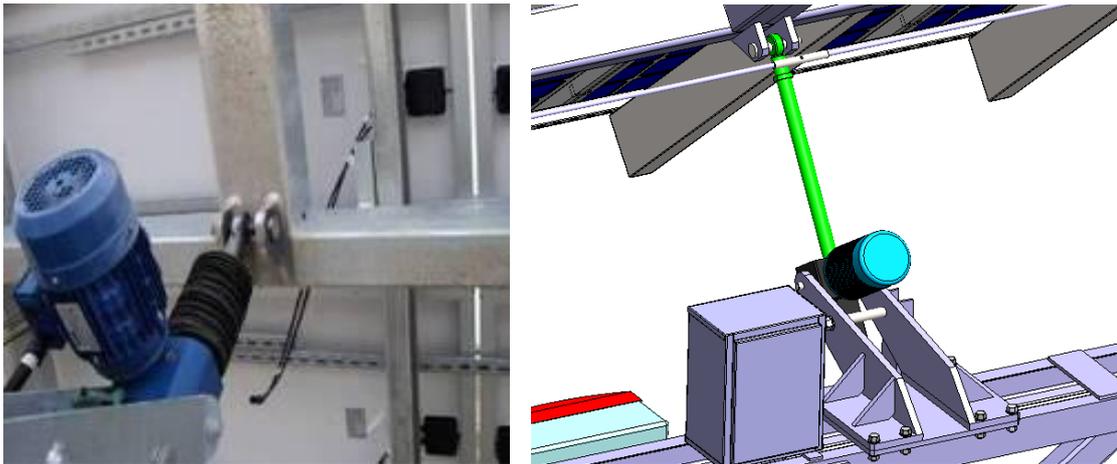
### 3.2.2 Système de poursuite

Les deux mouvements pour les deux systèmes de suiveur sont assurés par deux dispositifs mécaniques de réduction découplés.

**Système MS-2 TRACKER 10+ :** Le premier mécanisme est un motoréducteur pour l'entraînement en azimut (vertical). Comportant quatre étages d'engrenages combinés avec une couronne d'orientation, Ce mécanisme possède un rapport de réduction de 1/1500 t/mn et il est placé en bas du système, comme illustré sur la Figure (3.7.a). Pour le mouvement d'élévation est assuré par un vérin mécanique d'actionnement électrique (Moteur 0.75 kW 220/380V IP55 1500 t/mn). Comme illustré sur la Figure (3.7.b).



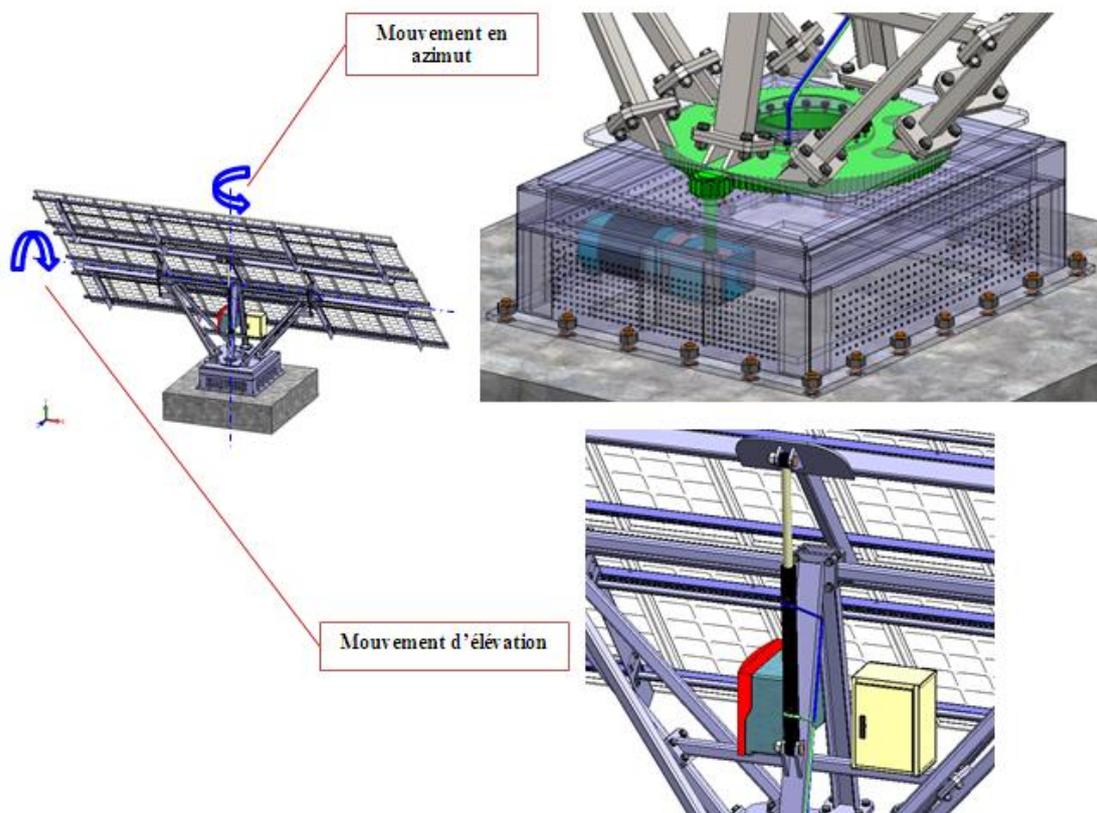
(a)



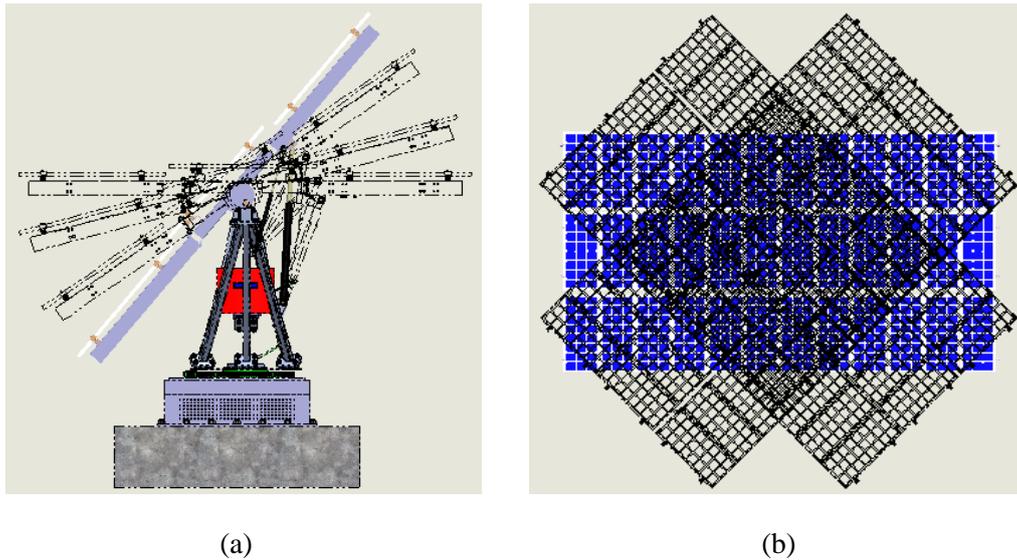
(b)

**Figure 3.7 :** *Système de poursuite du système MS-2 TRACKER 10+ (a) Mécanisme du mouvement d'azimut (b) Mécanisme du mouvement d'élévation.*

**Nouveau système :** Le mouvement en azimut est assuré par un motoréducteur (Motoréducteur Mb 2401 S1 B00 D-45 MuB14-4PLS8FCR-0.9kW) et un train d'engrenage à dentures droites, comme illustré sur la Figure (3.8.a). Le mouvement d'élévation est fait en utilisant un vérin hydraulique entraîné par une centrale hydraulique (centrale hydraulique entraîne quatre suiveurs solaires), comme illustré sur la Figure (3.8.b).



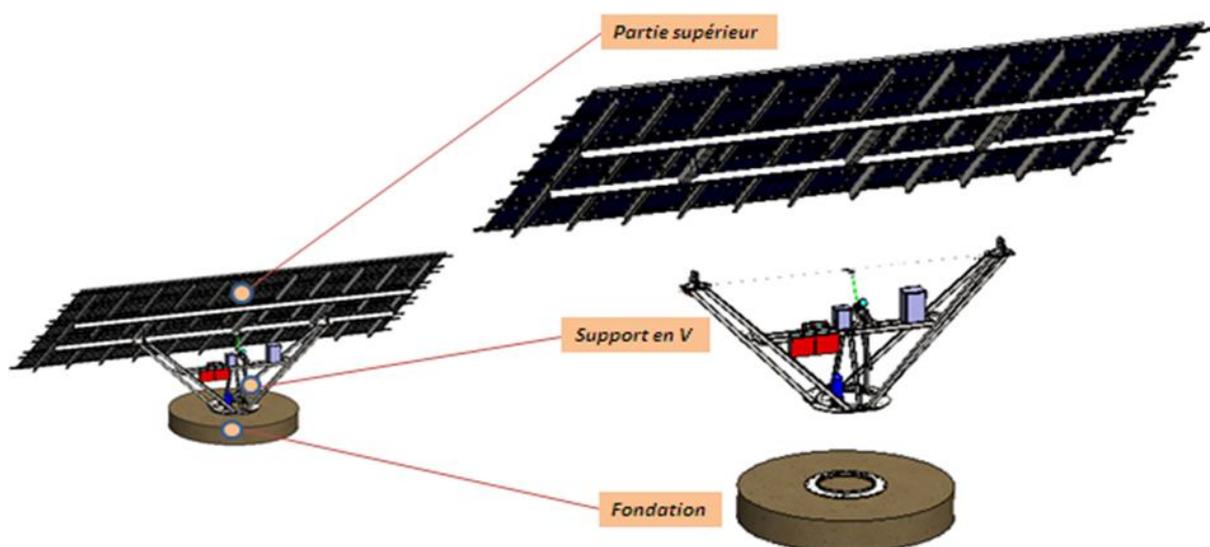
**Figure 3.8 :** *Système de poursuite du nouveau système.*



**Figure 3.9 :** (a) La rotation d'élévation; (b) La rotation en azimut.

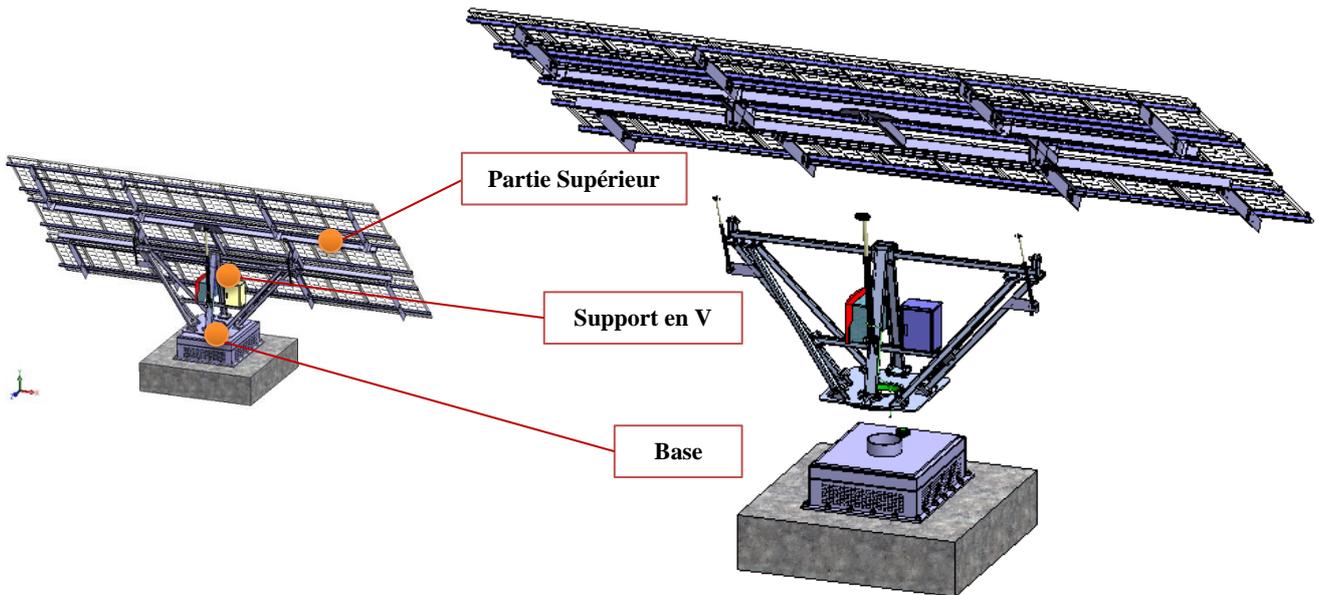
### 3.2.3 Structure des systèmes

**Système MS-2 TRACKER 10+ :** Le SSS est constitué de deux parties principales en acier galvanisé immersion à chaud: la partie inférieure qui comporte une structure métallique en V, un vérin mécanique d'actionnement électrique (actionneur) et deux amortisseurs hydrauliques dans les extrémités de la structure. Cette structure est basée sur une fondation ou une base en béton armé. La deuxième partie, comporte une grille métallique qui soutient les panneaux photovoltaïques (60 PV) de surface 90 m<sup>2</sup> de 12.8 kWp [MEC, 2009]. Une vue éclatée exploitée de ces parties sont montrées dans la Figure (3.9).



**Figure 3.10 :** Structure du suiveur solaire MS-2 TRACKER 10+.

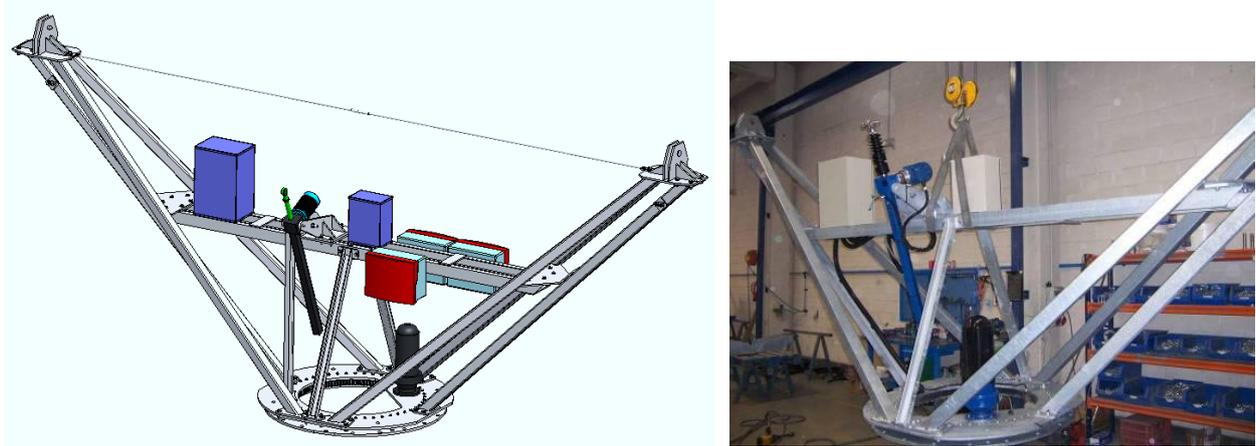
**Structure du nouveau système :** Le NSSS2 est composé de trois sous-structures métalliques essentielles. Chaque sous-structure a son propre objectif spécifique, et donc nécessite considérations particuliers ces sous-structures sont le support principale en forme V, la base (Socle) et la partie supérieure (la grille). Cette structure est basée sur une fondation ou une base en béton armé. Une vue éclatée exploitée de ces sous-structures est montrée dans la Figure (3.10).



*Figure 3.11 : Structure du nouveau système de suiveur solaire.*

#### **A) Partie intermédiaire (Support en V)**

Le support principale est une structure de forme "V". Cette conception permet une répartition symétrique des forces générées dans la structure, la distribution des charges sur les parties les plus robustes et les plus fortes de la structure métallique. Les deux supports sont présentés dans les Figures (3.11 et 3.12).



(a)

(b)

Figure 3.12 : Support en V du MS-2 TRACKER 10+, (a) Support modélisé (b) Support réel.

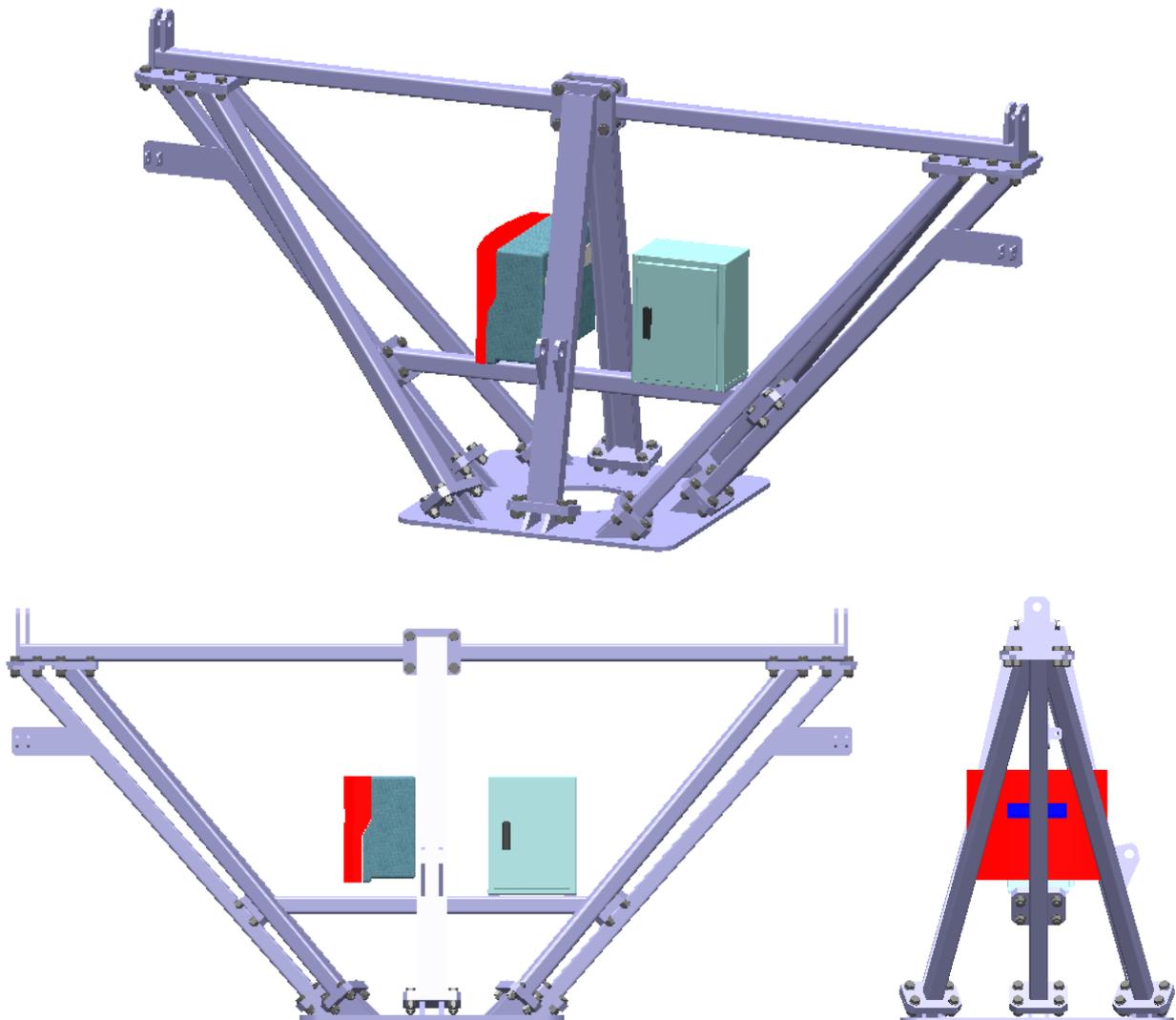


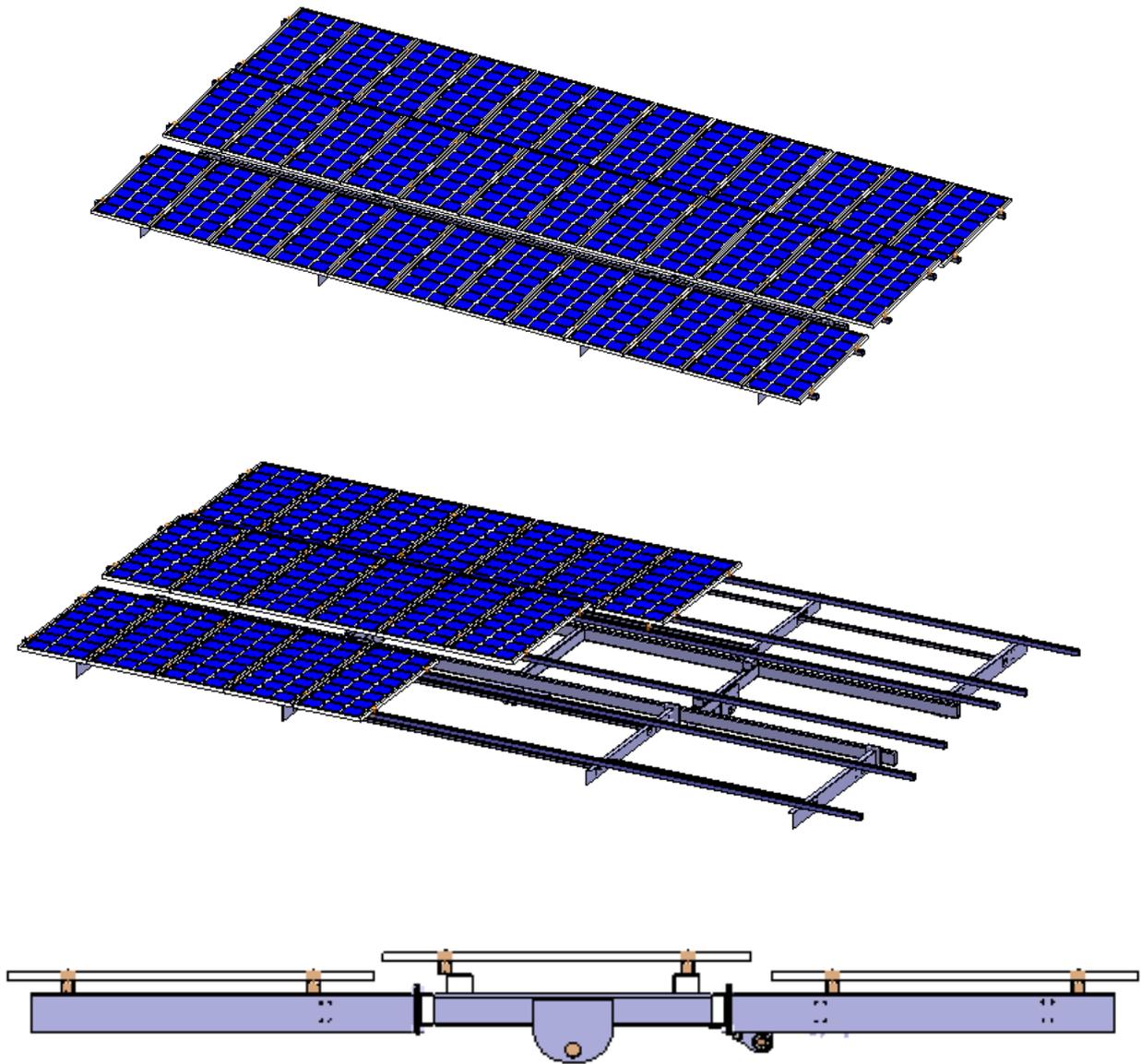
Figure 3.13 : Support en V du nouveau système, (a) Vue isométrique ; (b) Vue de droite.

### B) Partie supérieure

Dans la conception des suiveurs solaires, la structure des panneaux occupe une place très importante. En effet leur masse et leur raideur ont des impacts directs sur la conception, le choix des matériaux, des composants, etc. La partie supérieur (Figure 3.13 et 3.14), comporte une grille métallique (matériaux légers) qui supporte soixante (60) PV de 200 Watts de marque PCA200-A01 (*YACASOL- Japon*) pour le système MS-2 et trente six (36) PV de 100 Watts de marque STP080S-12/Bb (*SUNTECH*) pour le NSSS2. La configuration est effectuée en cinq rangées de douze PV chacune pour MS-2 et trois rangées de douze PV pour le NSSS2. Les spécification les deux PV sont présentes dans Tableau (3.1).



**Figure 3.14 :** La partie supérieure et la grille métallique du système MS-2 TRACKER 10+.



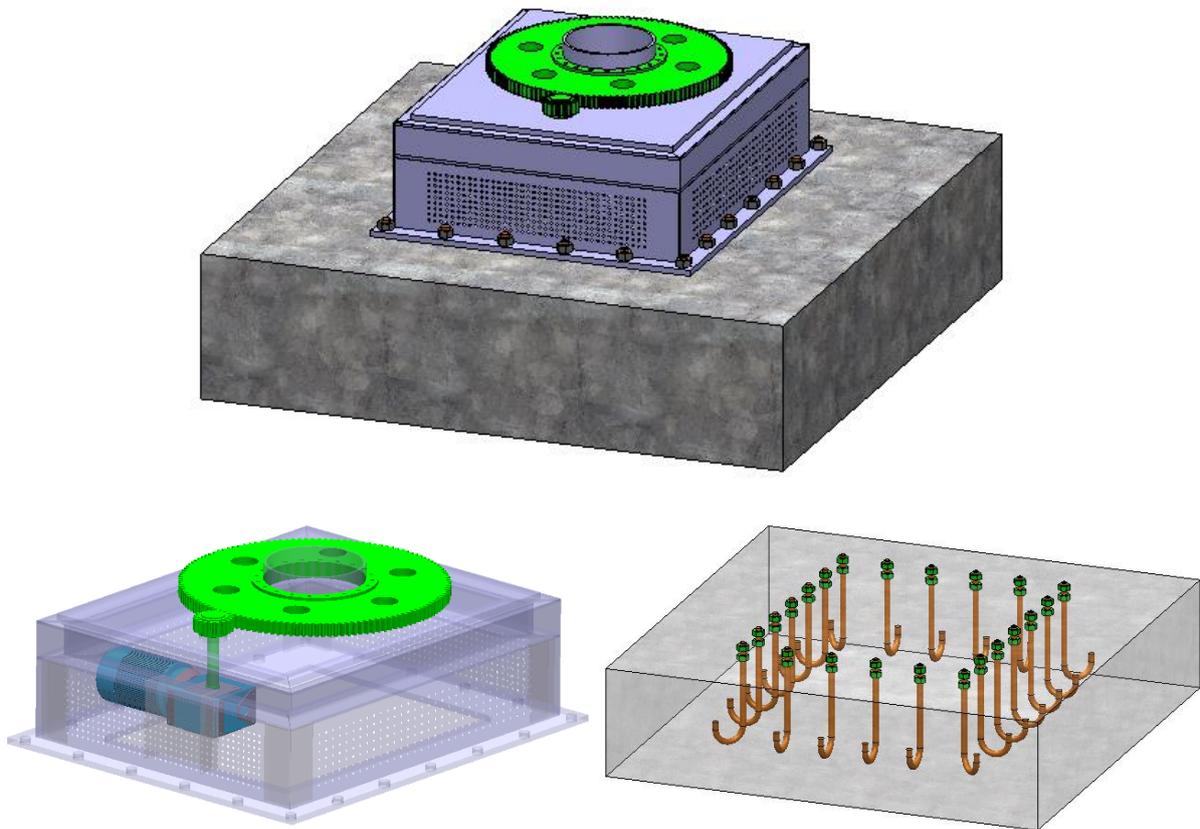
*Figure 3.15 : La partie supérieure et la grille métallique du nouveau système.*

*Tableau 3.1 : Spécification les deux PV.*

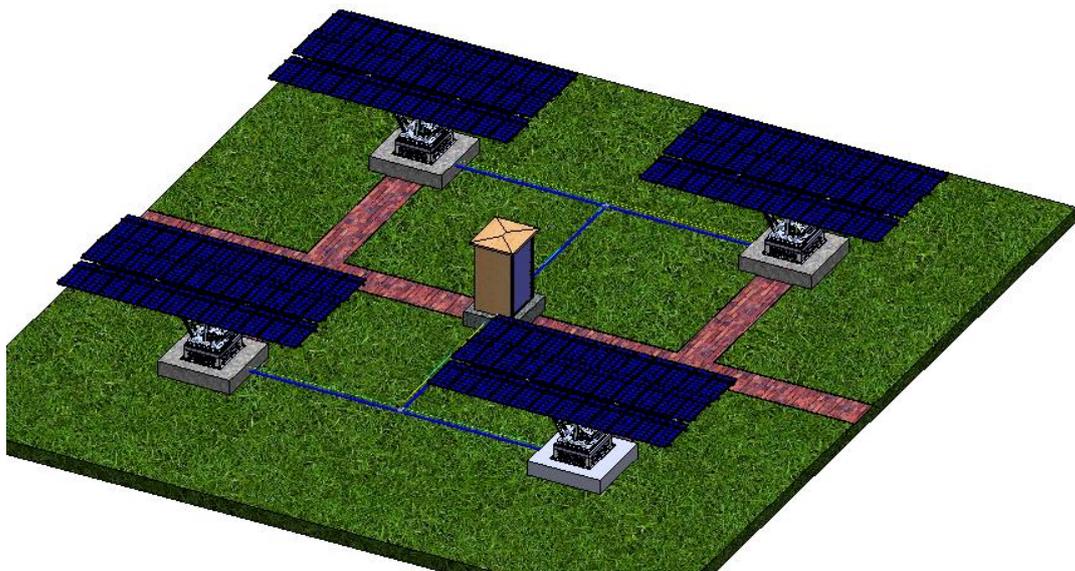
Paramètres	Valeur	
	PV : PCA200-A01	PV : STP080S-12/Bb
Puissance (Power output)	200 Watt	100 Watt
Longueur	1480 mm	1195 mm
Largeur	985 mm	541 mm
Épaisseur	46 mm	30 mm
Poids	19 kg	8 kg

### C) Partie inférieure

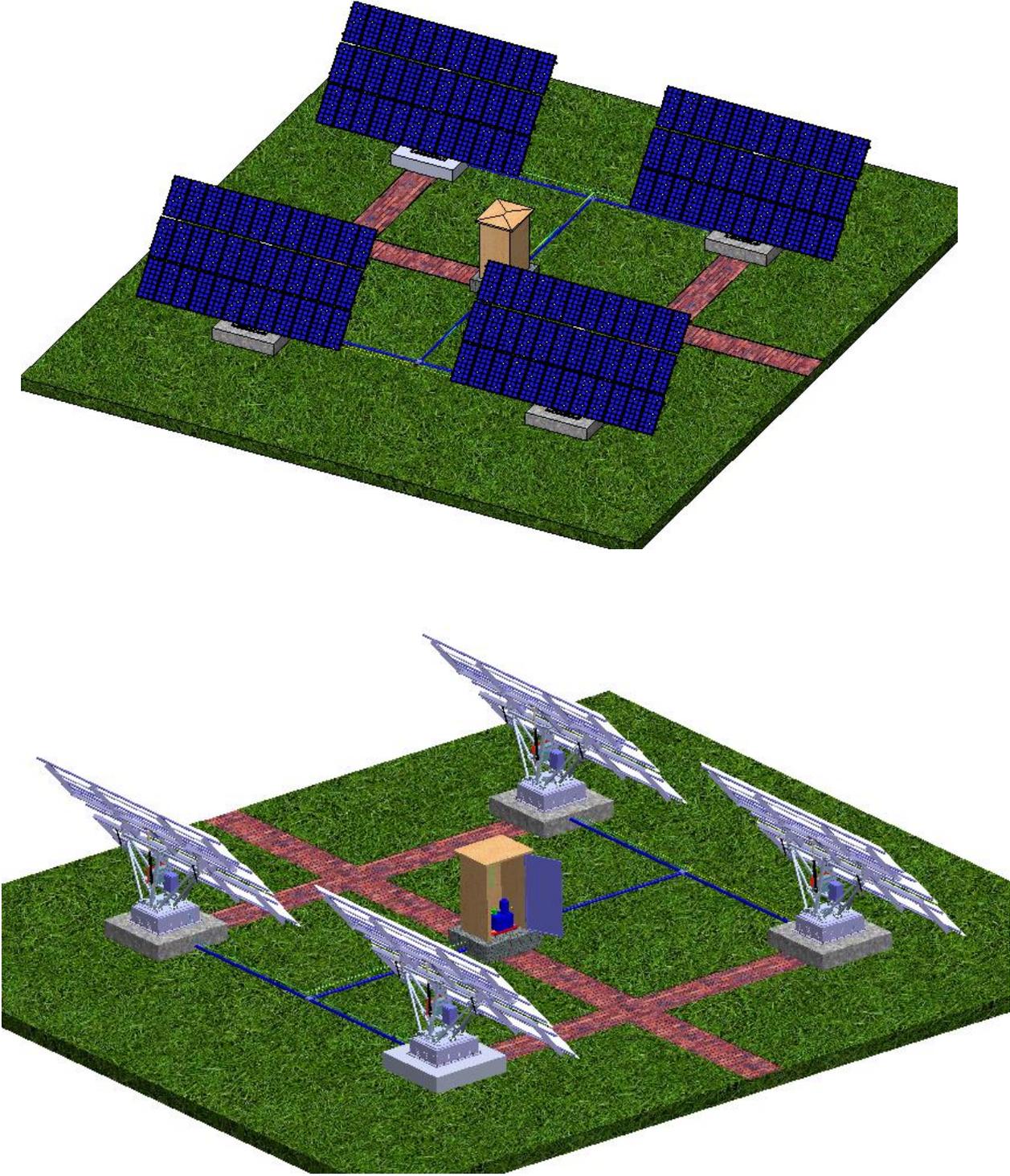
La partie inférieure (Figure 3.15) comporte un socle métallique (Tube IPN), un motoréducteur et un train d'engrenage. Cette sous-structure basée sur une fondation ou une base en béton armé par des tiges d'ancrages.



*Figure 3.16 : La partie inférieure et la fondation du nouveau système de suiveur.*



*Figure 3.17 : Centrale photovoltaïque (14.4 kW) en position 0° (horizontale).*



*Figure 3.18 : Centrale photovoltaïque (14.4 kW) en position 50° (extrême).*

**Tableau 3.2 : Caractéristique techniques du nouveau système de suiveur solaire.**

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES		
Axes de suivi	2 axes : Azimutal et Zénithal	
Configuration de la grille	3 rangées x 6.58 mètres	Extensible à 3 x 7.5 mètres
Surface des modules	24.26 m <sup>2</sup>	Surface maximale = 27.95 m <sup>2</sup>
Distribution des PV	Type	PV monocristallin SUNTECH, PV : STP080S-12/Bb, puissance nominale de 100 Wp. Dimensions extérieures du module = 1195 x 541 x 30 mm
	Quantité/Puissance	3 rangées x 12 PV   36 PV x 100 Wp = 3.6 kWp

**Tableau 3.3 : Caractéristique techniques du système de MS-2 TRACKER 10+.**

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES		
Axes de suivi	2 axes : Azimutal et Élévation	
Configuration de la grille	5 rangées x 11.91 mètres	Extensible à 3 x 12.16 mètres
Surface des modules	88.2 m <sup>2</sup>	Surface maximale = 90 m <sup>2</sup>
Distribution des PV	Type	PV monocristallin YACASOL-Japon, PV : PCA200-A01, puissance nominale de 200 Wp. Dimensions extérieures du module = 1480 x 985 x 46 mm
	Quantité/Puissance	5 rangées x 12 PV <span style="float: right;">60 PV x 200 Wp = 12 kWp</span>

**Tableau 3.4 : Caractéristique techniques les deux systèmes de suiveur solaire.**

Paramètres	Valeur	
	MS-2 TRACKER 10+	NOUVEAU SYSTEME
Superficie maximale des panneaux	88.2 m <sup>2</sup>	24.26 m <sup>2</sup>
Puissance photovoltaïque maximale	12 kWp (en fonction de l'efficacité des panneaux)	3.6 kWp (en fonction de l'efficacité des panneaux)
Actionnement Azimutal	Par motoréducteur et couronne dentée (d'orientation)	Motoréducteur et un train d'engrenage à dentures droites
Angle de rotation Azimut	Axe vertical : -120° à +120°	Axe vertical : -120° à +120°
Actionnement Inclinaison	vérin mécanique d'actionnement électrique	Vérin hydraulique (centrale hydraulique entraîne quatre suiveurs solaires)
Angle de rotation d'élévation	Réglage : 0° à 60°	Réglage : 0° à 50°
Hauteur du suiveur	à 60° : 6700 mm (du sol aux panneaux supérieures)	à 50° : 3910 mm (du sol aux panneaux supérieurs)
Structure	Structure en acier galvanisé par immersion à chaud	Structure en acier galvanisé
Poids sans PV et sans fondation	2263 kg	1489.4 kg
Onduleurs	3 onduleurs SMA Sunny Boy 3,3 kW nominaux, IP 65	1 onduleur SMA Sunny Boy 3.8 kW nominaux, IP 65. Possibilités d'installer d'autres onduleurs.
Panneaux à installer	PCA200-A01 (YACASOL)	STP080S-12/Bb (SUNTECH)
Poids maximums des panneaux	1250 kg	300 kg

## **3.2 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre la conception et la modélisation géométrique détaillée des deux structures mécaniques des systèmes de suiveur solaire à deux axes (Système de type MS-2 "à grande échelle" & NSSS2 de notre recherche). La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation générale de la technique de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), et la motivation de son choix pour le traitement du système de suiveur objet de cette thèse.

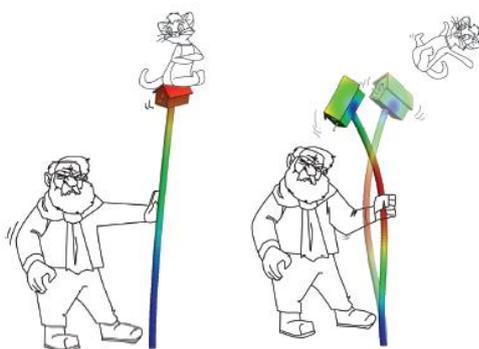
Dans la deuxième partie, nous avons pu réaliser le dessin et la conception de l'ensemble des deux systèmes. Ces systèmes qui sont constitués de plus de 800 pièces mécaniques différentes pour le système MS-2 et plus de 600 pièces pour le NSSS2, ont été conçu judicieusement de façon à assurer un fonctionnement optimal et une fiabilité maximale.

*Chapitre***Simulation Numérique 3D par****4****Éléments Finis****Sommaire**

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>Méthode des éléments finis</b> .....	<b>65</b>
<b>4.3</b>	<b>Description de l'outil de simulation utilisé</b> .....	<b>66</b>
<b>4.4</b>	<b>Les erreurs dans l'analyse par éléments finis 3D</b> .....	<b>68</b>
<b>4.5</b>	<b>Simulation numérique des deux modèles de systèmes du suiveur solaire par éléments finis 3D</b> .....	<b>68</b>
4.5.1	Simplification des modèles .....	69
4.5.2	Choix des matériaux de construction .....	70
4.5.3	Conditions aux limites .....	71
4.5.4	Maillage des systèmes .....	75
4.5.5	Choix du solveur .....	77
<b>4.6</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>78</b>

**Résumé**

Ce chapitre porte sur la procédure complète de simulation numérique du comportement statique des deux SSS2 soumis à leurs poids propres, aux conditions aux limites et chargements critiques du vent et de la neige pour les deux SSS2, dynamique libre en gardant les mêmes chargements intrinsèques du modèle statique, sauf l'excitation extérieure du vent qui est supprimée du modèle de la dynamique forcée sous des charges critiques du vent d'un NSSS2 par éléments finis 3D sous le module SOLIDWORKS/Simulation.



## 4.1 Introduction

Depuis les dernières décennies, la MEF est largement utilisée pour réaliser de véritables études d'ingénierie dans tous les domaines, non seulement parce qu'elle peut réduire considérablement le coût de la conception, mais aussi parce qu'elle peut établir les phénomènes physiques complexes. Elle aide les ingénieurs à mieux comprendre les processus de déformation et de contrôler la qualité de produits. L'application de cette méthode dans une classe importante de problèmes exige des outils numériques appropriés et robustes pour une mise en œuvre souple et efficace. Dans ce cadre et afin de répondre à ces exigences, il est essentiel de choisir et de développer des éléments finis appropriés pour accélérer les processus de conception et de réduire les coûts de calcul pour ces problèmes. Après avoir construit un modèle, nous devons nous assurer qu'il fonctionne efficacement dans ses conditions d'utilisation. En l'absence d'outils d'analyse, cette tâche ne peut être remplie sauf qu'en exécutant de très longs et très coûteux cycles de développement du produit. Un cycle typique de développement d'un produit inclut les étapes suivantes:

- Construction de notre modèle.
- Construction du prototype de conception.
- Test du prototype en conditions réelles.
- Evaluation des résultats des tests en conditions réelles.
- Modification de la conception en fonction des résultats des tests en conditions réelles.

Ce processus continue jusqu'à ce qu'une solution acceptable soit trouvée. L'analyse permet d'atteindre les objectifs suivants :

- Réduction des coûts par simulation des tests du modèle sur ordinateur au lieu de leur exécution réelle coûteuse.
- Réduction de la durée de développement par diminution du nombre de cycles de développement du produit.
- Amélioration des produits par des tests rapides de différentes conceptions et scénarios avant la prise de décision finale, permettant de disposer de plus de temps pour réfléchir à de nouvelles conceptions.

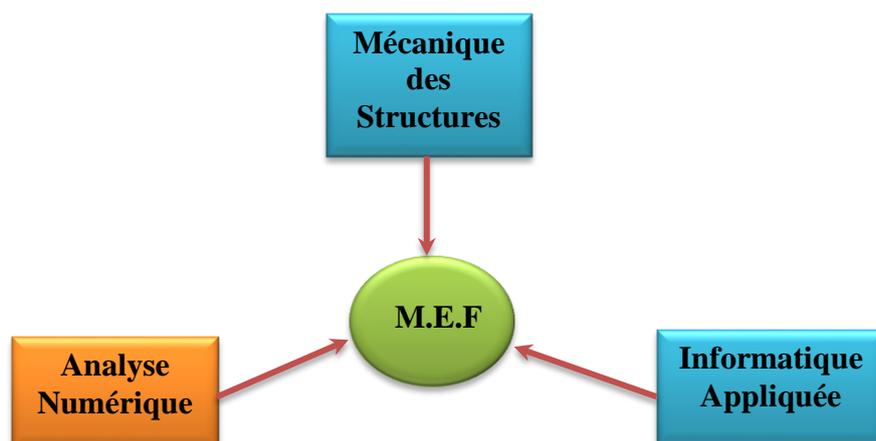


*Figure 4.1 : Discretisation de différents solides et structures avec les éléments finis [OÑA, 2009].*

## 4.2 Méthode des éléments finis

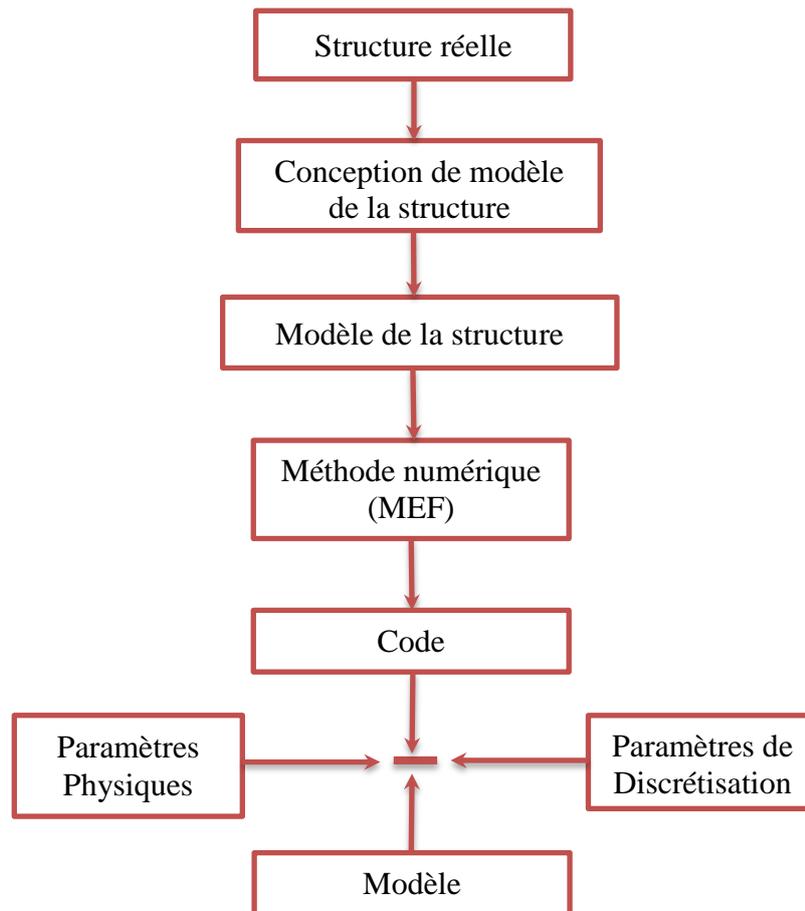
Les techniques de calcul des structures ont connu ces dernières années un développement considérable. Elles sont motivées par les besoins des industries de pointe et soutenues par les progrès effectués en informatique. Après plus de 50 ans de développement, La MEF (FEM, pour Finite Element Method) [TUR, 1956 & CLO, 1960] est devenue l'un des outils les plus puissants et populaires pour des simulations numériques dans les différents domaines des sciences naturelles et d'engineering (aérospatial, nucléaire, génie civil, construction navale, génie mécanique...).

Par ailleurs, il est intéressant de remarquer que la M.E.F appliquée au calcul des structures est une technique récente, à caractère pluridisciplinaire (Figure 4.2), car elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base : La mécanique des structures, l'analyse numérique et l'informatique appliquée [IMB & CHA, 2007].



*Figure 4.2 : Caractère pluridisciplinaire de la M.E.F [CHA, 2007].*

Les logiciels commerciaux disponibles sont maintenant largement utilisés dans la conception technique des structures en raison de leur polyvalence pour les solides et les structures de géométrie complexe et de leur applicabilité pour de nombreux types de problèmes linéaires et non linéaires. Théoriquement, les chercheurs tentent d'améliorer le développement actuel des logiciels de calcul par éléments finis en les enrichissant par des éléments finis robustes et performant.



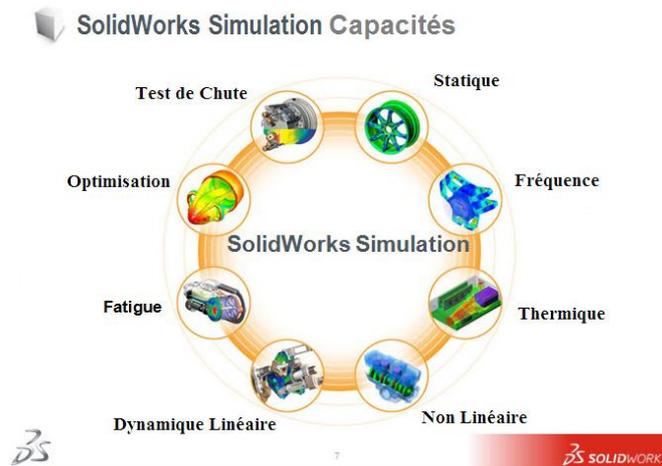
*Figure 4.3 : La démarche de la structure réelle au modèle informatique [OÑA, 2009].*

### 4.3 Description de l'outil de simulation utilisé

Le logiciel utilisé pour les simulations numériques (Statiques & Dynamique) en modèle éléments finis tridimensionnels est SOLIDWORKS/Simulation (*version 2013*). SOLIDWORKS/Simulation (précédemment connu comme COSMOSWorks) est un système d'analyse de conception totalement intégré à SOLIDWORKS. SOLIDWORKS/Simulation permet d'obtenir, à partir d'un seul écran, des solutions d'analyse fréquentielles, thermiques, de contraintes, de flambement et d'optimisation. Grâce à ses solveurs rapides, SOLIDWORKS/Simulation permet de résoudre rapidement des problèmes de grande ampleur, sur notre ordinateur personnel. SOLIDWORKS/Simulation est proposé en plusieurs configurations pour répondre à nos besoins d'analyse. SOLIDWORKS/Simulation raccourcit le délai de mise sur le marché en réduisant le temps et le travail nécessaires pour définir la solution optimale [COS, 2004 & DUD, 2009].

SOLIDWORKS/Simulation permet d'effectuer les principaux types d'analyses des structures voir Figure (4.4). Les paragraphes ci-dessous listent la totalité des modules offerts par SOLIDWORKS/Simulation [COS, 2004 & SOL, 2010].

- a) **Les études statiques** proposent des outils pour l'analyse des contraintes linéaires des pièces et des assemblages chargés au moyen de chargements statiques.
- b) **Les études fréquentielles** proposent des outils d'analyse des modes et fréquences naturels. Une telle analyse est essentielle dans la conception ou dans de nombreux composants chargés à la fois de façon statique et dynamique.
- c) **Les études dynamiques** analysent les objets forcés par des charges variant avec le temps. Des exemples type sont les charges de choc de composants montés sur des véhicules, les turbines chargées par des forces oscillantes, les composants d'aviation chargés de façon aléatoire, etc.
- d) **Les études linéaires** (petites déformations structurelles, modèles créés avec un matériau de base) ainsi que les études non linéaires (grandes déformations structurelles, charges importantes et matériaux avancés) sont disponibles.
- e) **Les études de flambage** analysent la performance des pièces minces chargées en compression.
- f) **Les études thermiques** proposent des outils d'analyse du transfert thermique par l'intermédiaire de la conduction, de la convection et du rayonnement.
- g) **Les études de test de chute** servent à analyser la contrainte créée par des pièces mobiles rencontrant un obstacle.
- h) **Les études de fatigue** analysent la résistance des pièces et des assemblages chargés de façon répétée sur de longues périodes.
- i) **Les études de la pression des coques** traitent les paramètres de conception dans le processus de conception des coques sous des charges de pression internes ou externes.
- j) **Les études non linéaires** proposent des outils permettant d'analyser les contraintes dans des pièces et des assemblages subissant des chargements importants et/ou de grandes déformations.
- k) **Les études d'optimisation** sont appliquées pour améliorer (optimiser) votre conception initiale en fonction d'un ensemble de critères sélectionnés tels que, notamment, la contrainte maximale, le poids et la fréquence optimale.



*Figure 4.4 : Types d'analyses sous SOLIDWORKS/Simulation [UNI, 2014].*

#### 4.4 Les erreurs dans l'analyse par éléments finis 3D

L'analyse par élément finis sous SOLIDWORKS/Simulation introduit des erreurs inévitables. Elle comprend des erreurs d'idéalisation lors de la construction du modèle géométrique, des erreurs de discrétisation de la structure et des erreurs de résolution des équations numériques d'équilibre. Parmi ces trois sources d'erreurs, uniquement les erreurs de discrétisation sont spécifiques à cette analyse. Les autres types d'erreurs sont soit des erreurs qui sont introduites avant l'analyse par élément finis ou des erreurs d'accumulation et d'arrondi.

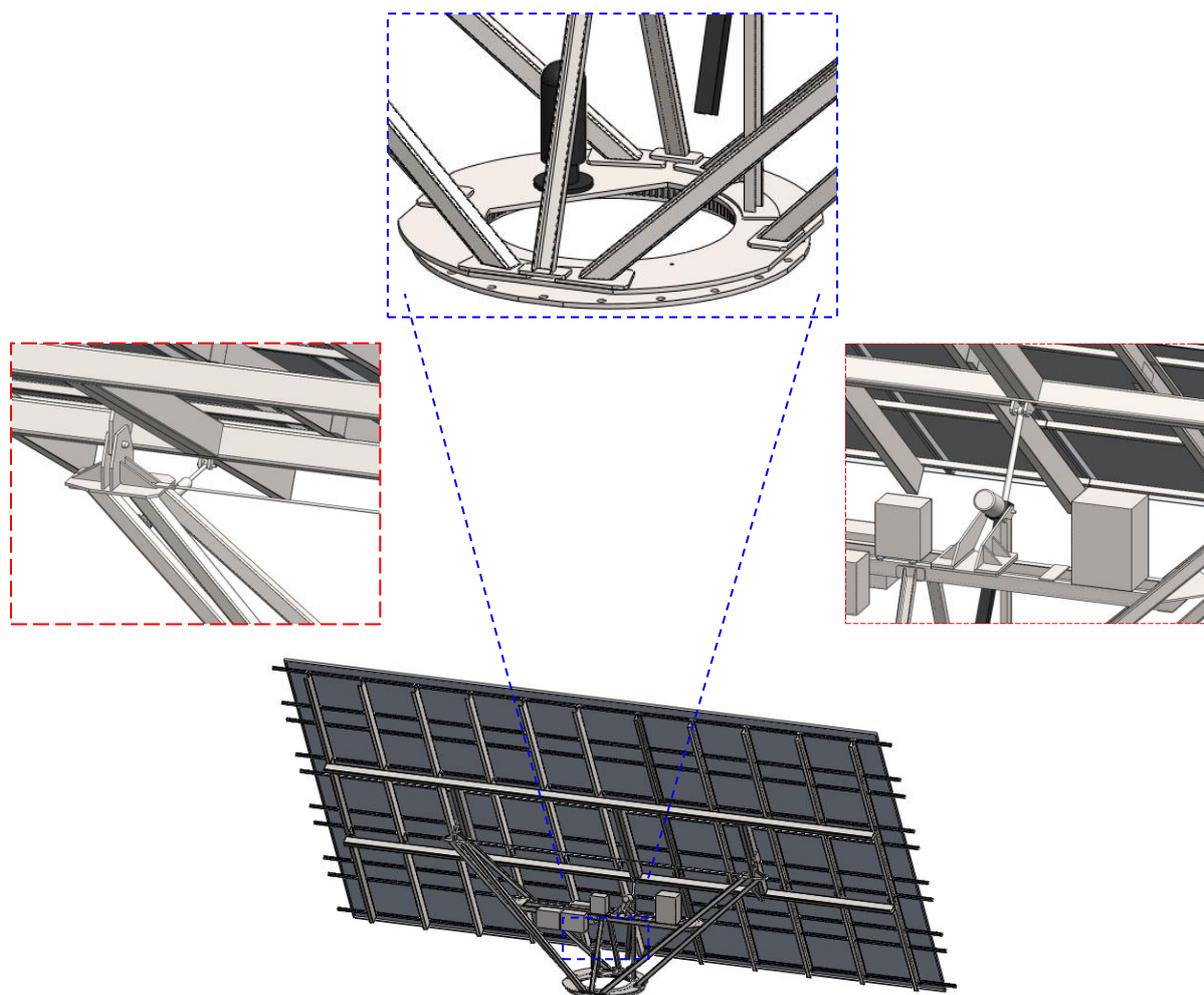
#### 4.5 Simulation numérique des deux modèles de système du suiveur solaire par éléments finis 3D

Un modèle est généralement soumis à différents environnements d'utilisation et conditions de fonctionnement au cours de sa vie. Il est donc important de tenir compte de tous les scénarios possibles de chargement, de conditions aux limites et d'essayer différentes propriétés de matériaux dans l'analyse d'un modèle [MUR, 2005]. La procédure d'analyse de la structure du système par éléments finis peut être définie par les facteurs suivants :

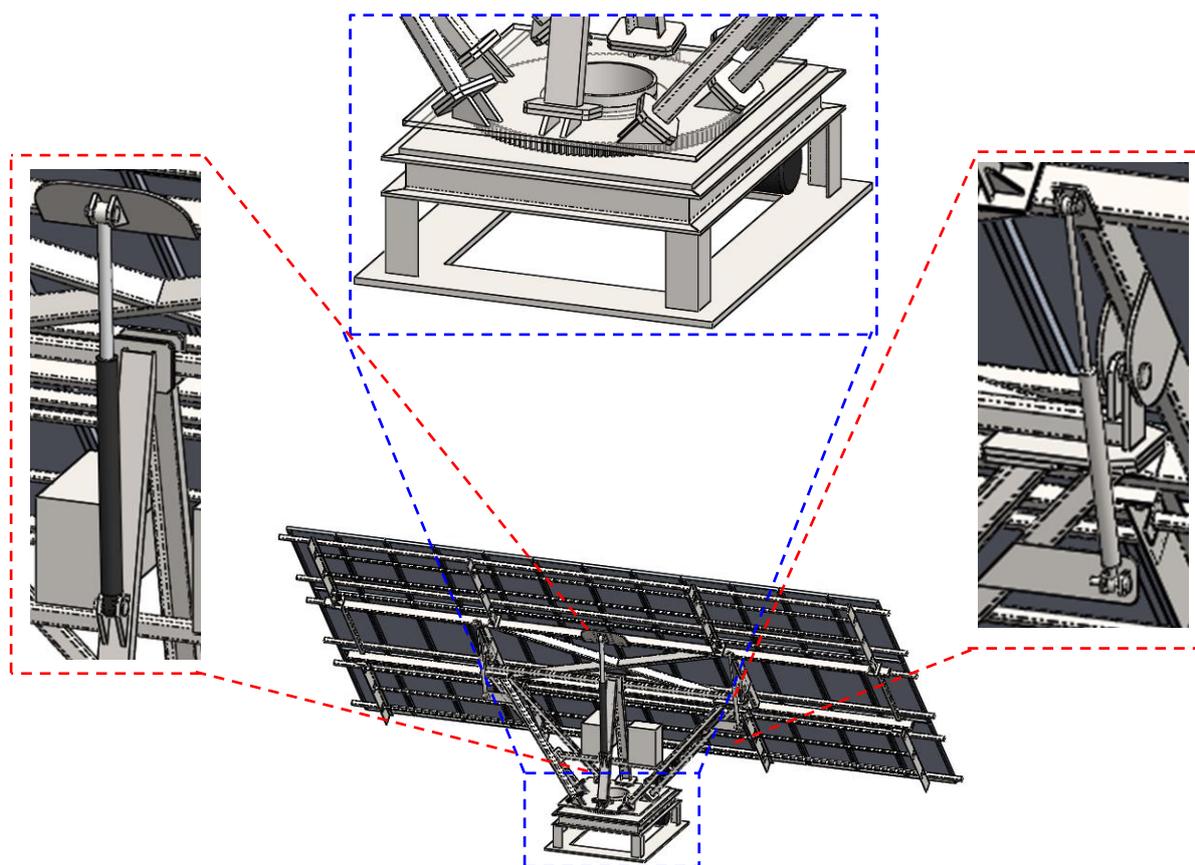
- Dimensions du modèle (simplification).
- Type d'étude et options associées pour définir l'objectif de l'analyse.
- Propriétés du matériau.
- Chargements et conditions aux limites.
- Maillage.
- Traitement et présentation des résultats.

### 4.5.1 Simplification des modèles

Les études par éléments finis sont généralement confrontées à deux limites souvent reliées, soit la taille du système et le temps de résolution. Si le modèle est très grand comparé à la taille d'éléments demandés, alors son maillage aura besoin d'un très grand nombre d'éléments. Ce maillage aura donc besoin de beaucoup de temps pour sa génération, et ce, si le maillage réussit à générer le maillage [BOU, 2010]. La suppression de détails cherche à retirer du modèle des petits détails qui n'ont qu'une influence négligeable sur le résultat final comme des congés non structuraux, des éléments décoratifs ou tout autre petit morceau qui ne sont pas beaucoup contraint. Ces petits détails sont parfois longs à modéliser et requièrent beaucoup d'éléments, rendant ainsi la résolution du problème plus longue. Les deux SSS2 comportent plus de 700 pièces. Pour calculer ces systèmes il faut réduire le nombre de pièces en ne conservant que les pièces essentielles à sa fonction (il faut exclure les vis, les écrous, les rondelles, etc...). Ces simplifications sont représentées en Figures (4.5 & 4.6).



*Figure 4.5 : Modèle du système de suiveur MS-2 TRACKER 10+ simplifié.*



*Figure 4.6 : Modèle du nouveau système de suiveur simplifié.*

#### 4.5.2 Choix des matériaux de construction

La structure des systèmes de suiveur est construite en grande majorité en Acier de construction. L'Acier présente une bonne usinabilité, soudabilité, rigidité et disponibilité sur le marché. Pour des considérations techniques et économiques. La bibliothèque disponible de SOLIDWORKS/Simulation permet de réaliser une étude avec un matériau proche du matériau réel. On peut aussi rentrer, et c'est conseillé, les caractéristiques réelles du matériau utilisé. Les matériaux des différentes pièces des systèmes de suiveur sont répertoriés dans le Tableau (4.1) ci-dessous.

*Tableau 4.1: Propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans les deux systèmes de suiveur*

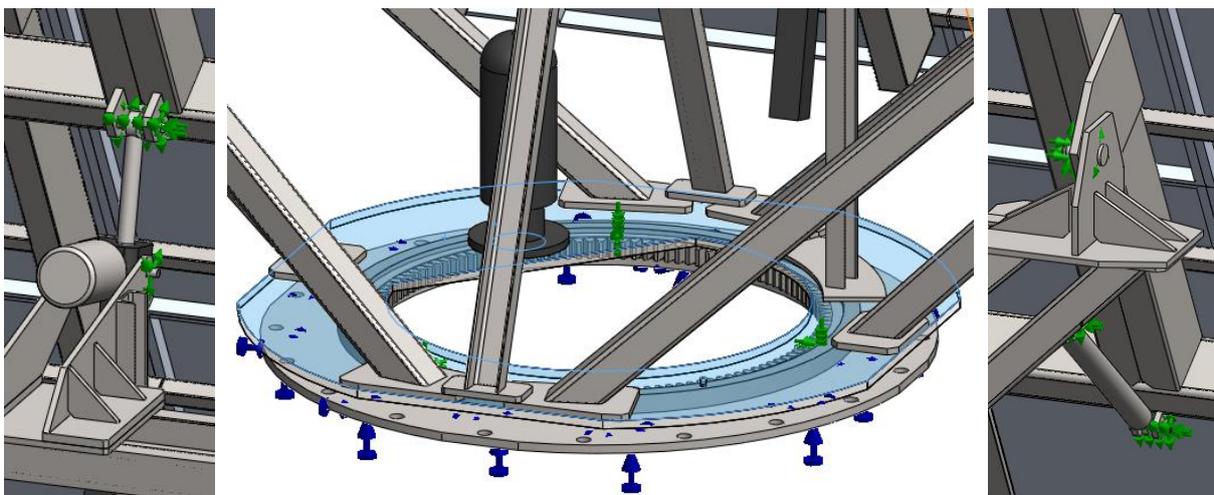
Matériaux	Module d'élasticité [GPa]	Coefficient de Poisson ----	Limite d'élasticité [MPa]	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]
Acier non Allié	210	0.28	220.59	7800
Acier AISI 1020	200	0.29	351.57	7900
Acier Galvanisé	200	0.29	203.94	7870
Alliage D'Aluminium 1060	69	0.33	27.57	2700

### 4.5.3 Conditions aux limites

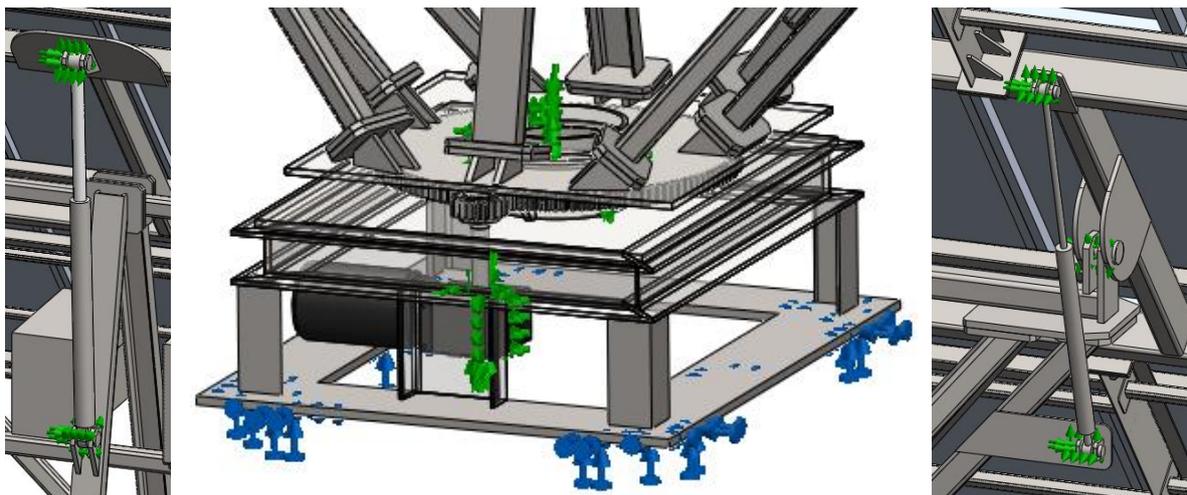
Les conditions aux limites sont nécessaires pour définir l'environnement de fonctionnement du modèle. Les résultats de l'analyse dépendent directement des déplacements imposés spécifiés et des chargements appliqués.

**A) Déplacements imposés :** Les déplacements imposés sont appliqués à des entités géométriques en tant que propriétés totalement associées à la géométrie et ajustées automatiquement en cas de modification de celle-ci. Les déplacements imposés mises en place pour les deux modèles de systèmes sont de deux types :

- i. Géométrie fixe (immobile) :** Ce type de déplacement imposé définit tous les degrés de liberté à zéro. Il est le même pour les coques, les poutres et les barres. Aucune géométrie de référence n'est utilisée. Pour les deux SSS2 on définit un déplacement imposé nul dans la base (socle).
- ii. Pivot fixe :** Le déplacement imposé pivot indique qu'une face cylindrique peut uniquement pivoter autour de son propre axe. Le rayon et la longueur de la face cylindrique restent constants sous l'effet d'un chargement. Cette condition revient à sélectionner le type de déplacement imposé sur une face cylindrique et à régler sur zéro la valeur des composants radiaux et axiaux. Pour le NSSS2 on définit des déplacements imposés pivot pour les deux axes du vérin hydraulique, les deux axes principaux, les deux axes de l'amortisseur, et le train d'engrenage (la roue et pignon de motoréducteur). Les conditions aux limites sont présentées en Figure (4.7 et 4.8).



*Figure 4.7 : Les déplacements imposés du système MS-2 TRACKER 10+.*



*Figure 4.8 : Les déplacements imposés du nouveau système.*

**B) Chargements :** Pour le calcul de la structure du suiveur solaire nous avons tenu compte des charges qui agissent excédent chacun de ses éléments, dans les différentes hypothèses considérées et considérants également pour les dimensions les charges les plus défavorables dans chaque cas. Les charges à considérer seront comme suit :

- i. **Charges fixes :** Le poids des matériaux qui composent la structure et le poids du matériel qui la soutient.
- ii. **Charges de vent :** Le calcul de la charge du vent est le premier paramètre important pour l'analyse mécanique. Cette charge est évaluée par les pressions ou par les forces; son effet sur des structures est selon les caractéristiques du régime de vent (comme la vitesse moyenne, les caractéristiques de turbulence, le facteur dynamique), les caractéristiques de la structure (forme, taille, orientation), les propriétés dynamiques (inertie, rigidité et amortissement) de la structure et l'endroit [EN, 2004]. Dans ce travail les deux SSS2 soumis à une charge critique de vent de 130 km/h. Les calculs détaillés sont présentées dans l'**Annexe 4-1**.
- iii. **Charges de la neige :** Dans ce travail les deux SSS2 soumis à une charge critique de neige dans la zone la plus neigée en Algérie (**Wilaya de Médéa**). Les calculs détaillés sont présentées dans l'**Annexe 4-2**.

### **Hypothèse pour le calcul**

- a) **Analyse statique :** Vents frontaux (130 km/h) + poids de la structure: Suiveur à 60° pour le système MS-2 et à 50° pour le NSSS2 voir Figures (4.9 & 4.10).  
Poids de la structure + de la neige: les deux SSS2 en position horizontale (à 0°).

**Tableau 4.2 : Chargements statiques des deux suiveurs**

Chargements	MS-2 TRACKER 10+	NSSS2
<b>Chargement du vent</b>	$P = 80 \text{ daN/m}^2$ (130 km/h) Position $60^\circ$	$P = 80 \text{ daN/m}^2$ (130 km/h) Positions $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ et $50^\circ$
<b>Chargement de la neige</b>	$P = 50 \text{ daN/m}^2$ Position horizontale (à $0^\circ$ )	$P = 66.9 \text{ daN/m}^2$ (Wilaya de <b>Médéa</b> ) Position horizontale (à $0^\circ$ ) (D'après l'Annexe 4-2)
<b>Poids (masse)</b>	3403 kg (Système global avec les 60 PV)	1789.4 kg (Système global avec les 36 PV)

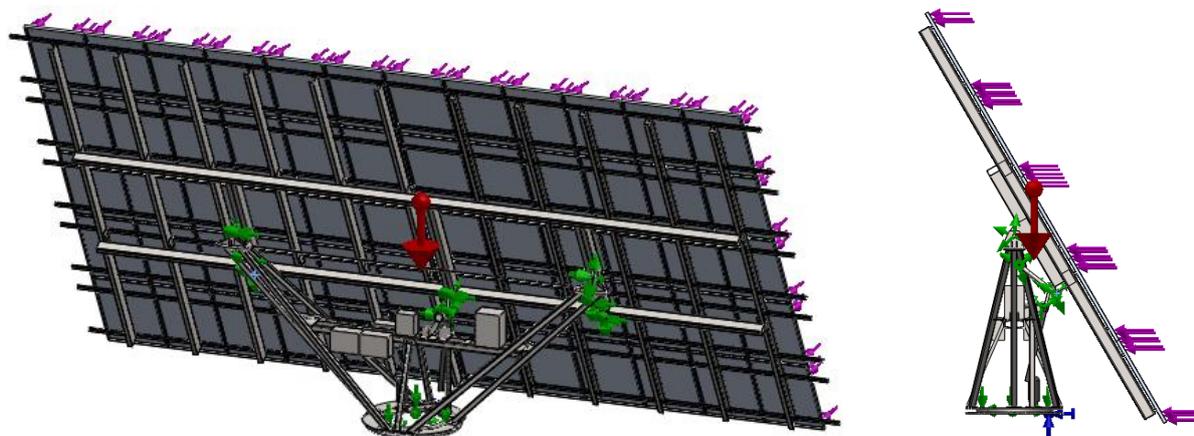
b) **Analyse modale** : on procède d'une manière similaire à l'analyse statique sauf que le système doit être considéré libre de tout changement.

c) **Analyse forcée** : Vents frontaux + couple de motoréducteur [MEC, 2009] + poids de la structure: NSSS2 en position  $50^\circ$ .

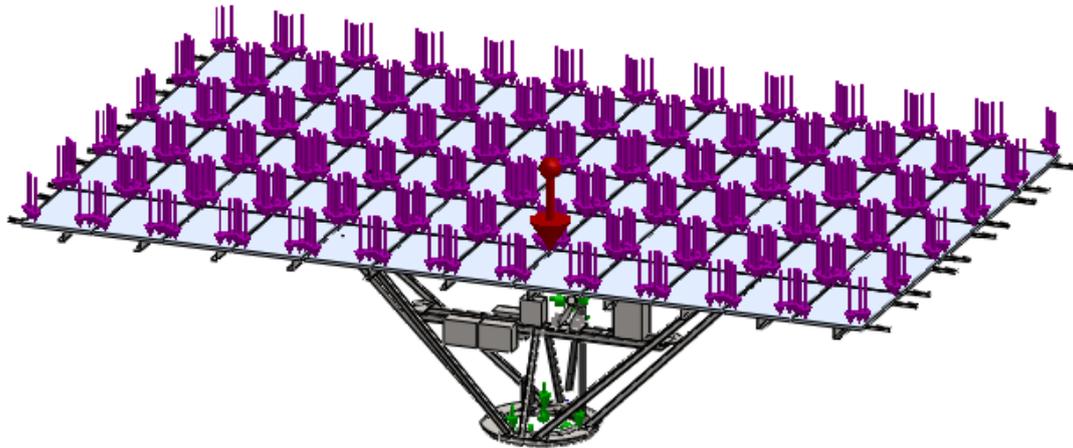
Poids de la structure + de la neige: NSSS2 en position horizontale (à  $0^\circ$ ).

**Tableau 4.3 : Chargements dynamiques du suiveur.**

Chargements	NSSS2
<b>Chargement du vent</b>	$P = 58.9 \text{ daN/m}^2$ ( $\approx 112 \text{ km/h}$ ) (Wilaya de <b>Djelfa</b> ) Positions $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ et $50^\circ$ (D'après l'Annexe 4-2)
<b>Chargement de la neige</b>	$P = 40 \text{ daN/m}^2$ Position horizontale (à $0^\circ$ )
<b>Couple motoréducteur</b>	$C = 2735 \text{ N.m}$

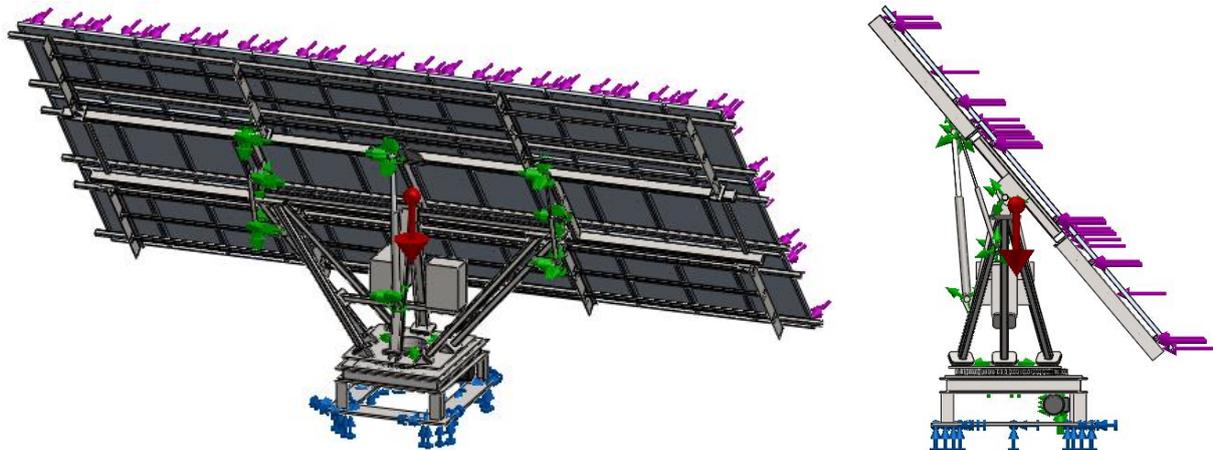


(a)

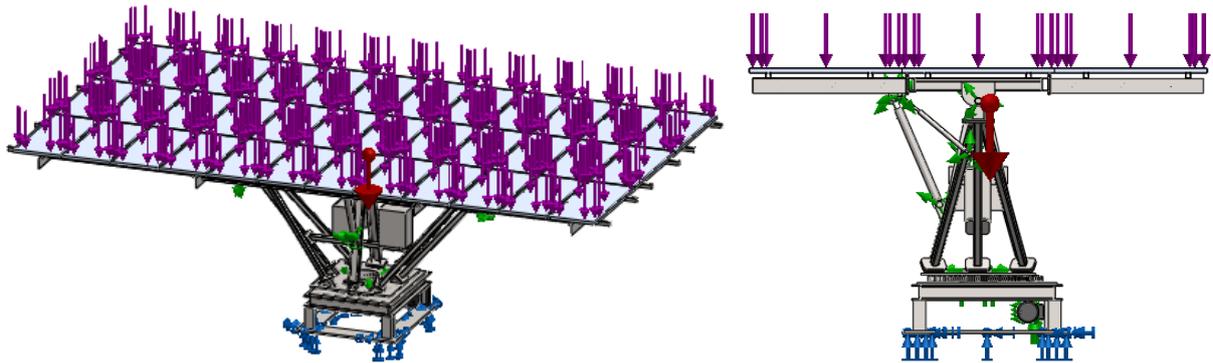


(b)

Figure 4.9 : Les chargements pour l'analyse statique du MS-2, (a) Cas de vent, (b) Cas de la neige

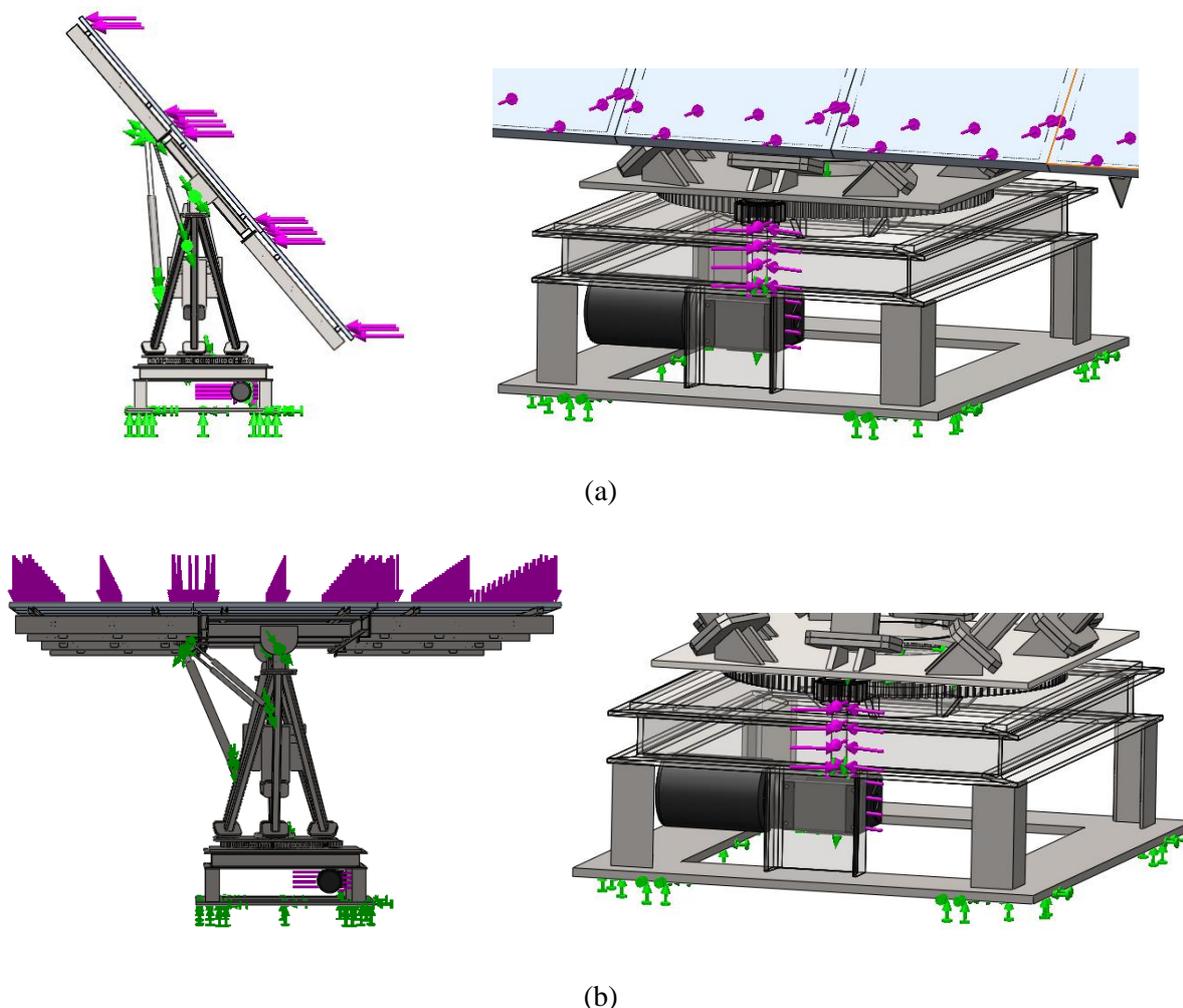


(a)



(b)

Figure 4.10 : Les chargements pour l'analyse statique du NSSS2, (a) Cas de vent, (b) Cas de la neige.



**Figure 4.11** : Les chargements pour l'analyse dynamique forcée du NSSS2, (a) Cas de vent, (b) Cas de la neige.

#### 4.5.4 Maillage des systèmes

Le maillage de la structure est une étape cruciale et fondamentale pour la MEF. La taille des éléments joue un rôle important dans la précision des résultats. On a toutefois tendance à trop diminuer la dimension des éléments en raffinant le maillage exagérément. L'approche simple et classique consiste à utiliser un maillage de départ grossier, de diminuer la taille de moitié et de noter les changements. Si les résultats ne varient pas de façon significative, cela tend à démontrer que le premier maillage était adéquat. L'homogénéité du maillage est un autre paramètre important.

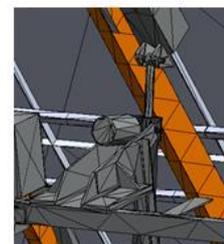
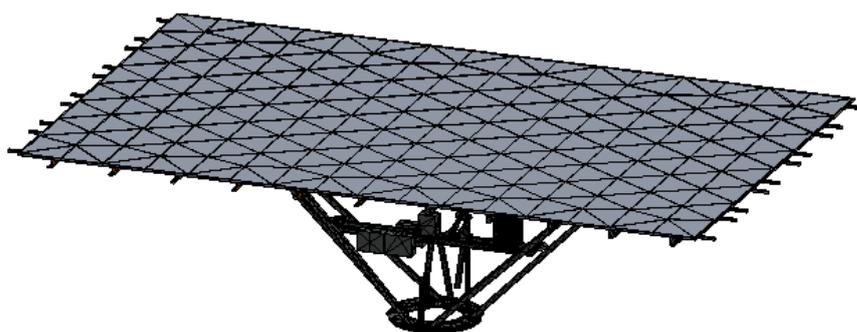
Le maillage éléments finis du suiveur solaire est généré en utilisant des éléments tétraédriques 3D. Il a été procédé aussi à un contrôle de maillage spécifique pour certaines pièces (pignon, roue, axes et etc....) pour lesquelles le maillage global a échoué à cause de leurs géométries complexes. Les maillages sont représentés en Figures (4.12 & 4.13). Les

informations concernant le maillage global des systèmes sont présentées dans le Tableau (4.2).

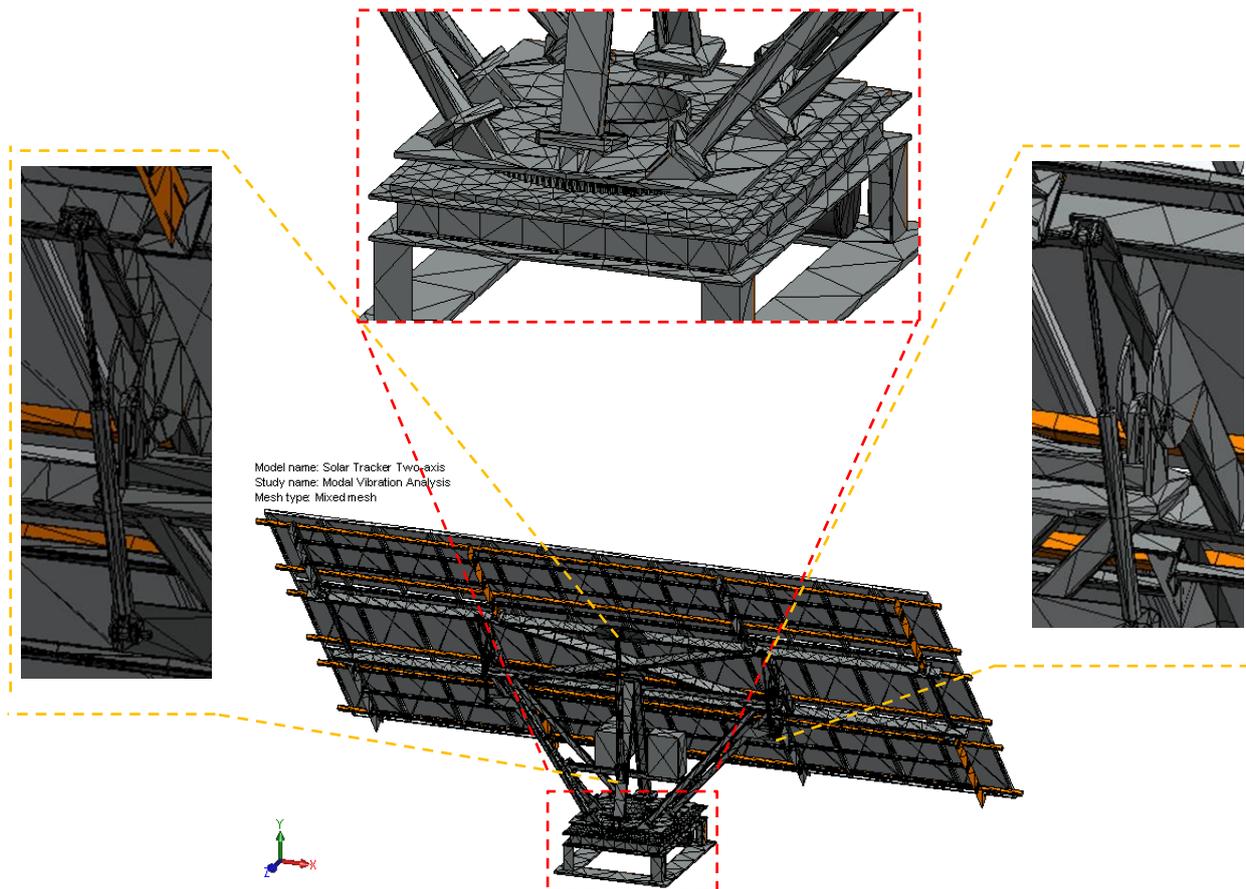
**Tableau 4.4 : Information sur le maillage global des systèmes**

	<b>MS-2 TRACKER 10+</b>	<b>Nouveau système</b>
<b>Taille de l'élément</b>	284.45 - 1422.26 mm	80.674 - 403.372 mm
<b>Qualité</b>	Haut	Haut
<b>Nombre d'éléments</b>	69032	92661
<b>Nombre de nœuds</b>	117254	164846
<b>degré de liberté (DDL)</b>	381564	536.436

Nom du modèle: MODELISATION \_ TRACKER SOLAIRE MODELE MS 2 - TRACKER 10  
Nom de l'étude: Etude Statique MS Neige  
Type de maillage: Maillage volumique



**Figure 4.12: Maillage 3D du système MS-2 TRACKER 10+ par éléments finis 3D.**



*Figure 4.13: Maillage 3D du nouveau système par éléments finis 3D*

#### 4.5.5 Choix du solveur

SOLIDWORKS/Simulation intègre un algorithme qui vérifie les propriétés de l'étude et les options de contact avant de lancer l'analyse. Dans une analyse par éléments finis, le problème est représenté par un système d'équations algébriques qui doivent être résolues simultanément. Il existe deux catégories de méthodes de résolution :

- i. **Les méthodes directes** : Les méthodes directes utilisent des techniques numériques exactes pour résoudre les équations.
- ii. **Les méthodes itératives** : Les méthodes itératives résolvent les équations en utilisant des techniques d'approximation dans lesquelles une solution est évaluée à chaque itération, ainsi que les erreurs associées. Les itérations sont poursuivies jusqu'à ce que l'erreur soit acceptable. Les solveurs itératifs **FFE** et **FFEPlus** utilisent des techniques différentes de réorganisation des équations et de stockage de données pour résoudre le problème. En général, tous les solveurs donnent des résultats comparables si les options retenues sont supportées.

Si tous les solveurs sont performants pour les petits calculs (< 30000 Degré de Liberté-DDL), il peut y avoir d'énormes différences en termes de vitesse et d'utilisation mémoire lorsqu'il faut résoudre de gros problèmes. Si le solveur nécessite plus de mémoire que disponible sur le PC, alors le solveur va utiliser de l'espace disque pour stocker et retrouver ses informations de calcul (« **swap** »). Quand cette situation se présente, vous êtes informé par un message « The solution is going out of core » indiquant que le processus de calcul va être obligé de (« **swapper** ») et que cela va le ralentir. Si la quantité de données à écrire sur le disque est très importante (Plusieurs Giga octets possible) alors le processus peut devenir extrêmement lent [ACO, 2004].

Pour la simulation d'un modèle nous utilisons.

#### a) Pour le calcul statique

Il y a trois solveurs pour les études statiques :

- i. **Le solveur direct (Sparse Solver) :** Utiliser le solveur direct lorsque nous utilisons les contacts en assemblage et particulièrement avec les frottements, lorsque nous avons des matériaux dont les caractéristiques sont très différentes et lorsque nous sommes en maillage mixte.
- ii. **Le solveur itératif FFE:** Utiliser le solveur FFE ou le solveur direct pour les petits et moyens calculs (entre 100000 et 300000 DDL).
- iii. **Le solveur itératif FFEPlus :** Utiliser FFEPlus pour les gros et les très gros calculs (> 300000 DDL). Si nous utilisons des contacts en assemblage, nous pouvons travailler avec FFEPlus.

#### b) Pour le calcul Modes Propres

Il y a trois solveurs pour les études statiques :

- i. **Le solveur direct (Sparse Solver) :** Utiliser le solveur direct si nous souhaitons prendre en compte les effets de chargement sur les fréquences naturelles et lorsque nous avons des matériaux dont les caractéristiques sont très différentes.
- ii. **Le solveur itératif FFE et FFEPlus :** Utiliser FFE ou FFEPlus si le modèle n'est pas complètement contraint (Modes rigides).

## 4.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la procédure de la simulation numérique par éléments finis 3D sous SOLIDWORKS/Simulation des deux SSS2. La démarche comporte l'analyse du comportement statique pour les deux systèmes sollicités par des chargements

gravitationnels, de pression de vent extrême de 130 km/h, de pression de neige (wilaya de Médéa) et des liaisons cinématiques et technologiques imposées (encastrement, pivot, couronne d'orientation, engrenage,...) et l'analyse dynamique (modale & forcée) pour le NSSS2.

## **Partie III**

# **RÉSULTATS & DISCUSSIONS**

## *Chapitre*

# Conception Statique des deux Systèmes de Suiveur Solaire à la Résistance **5**

---

### Sommaire

5.1	Introduction .....	82
5.2	Système de suiveur solaire MS-2 TRACKER 10+ .....	82
5.3	Système du nouveau prototype de suiveur solaire .....	87
5.4	Conclusion .....	99

---

## 5.1 Introduction

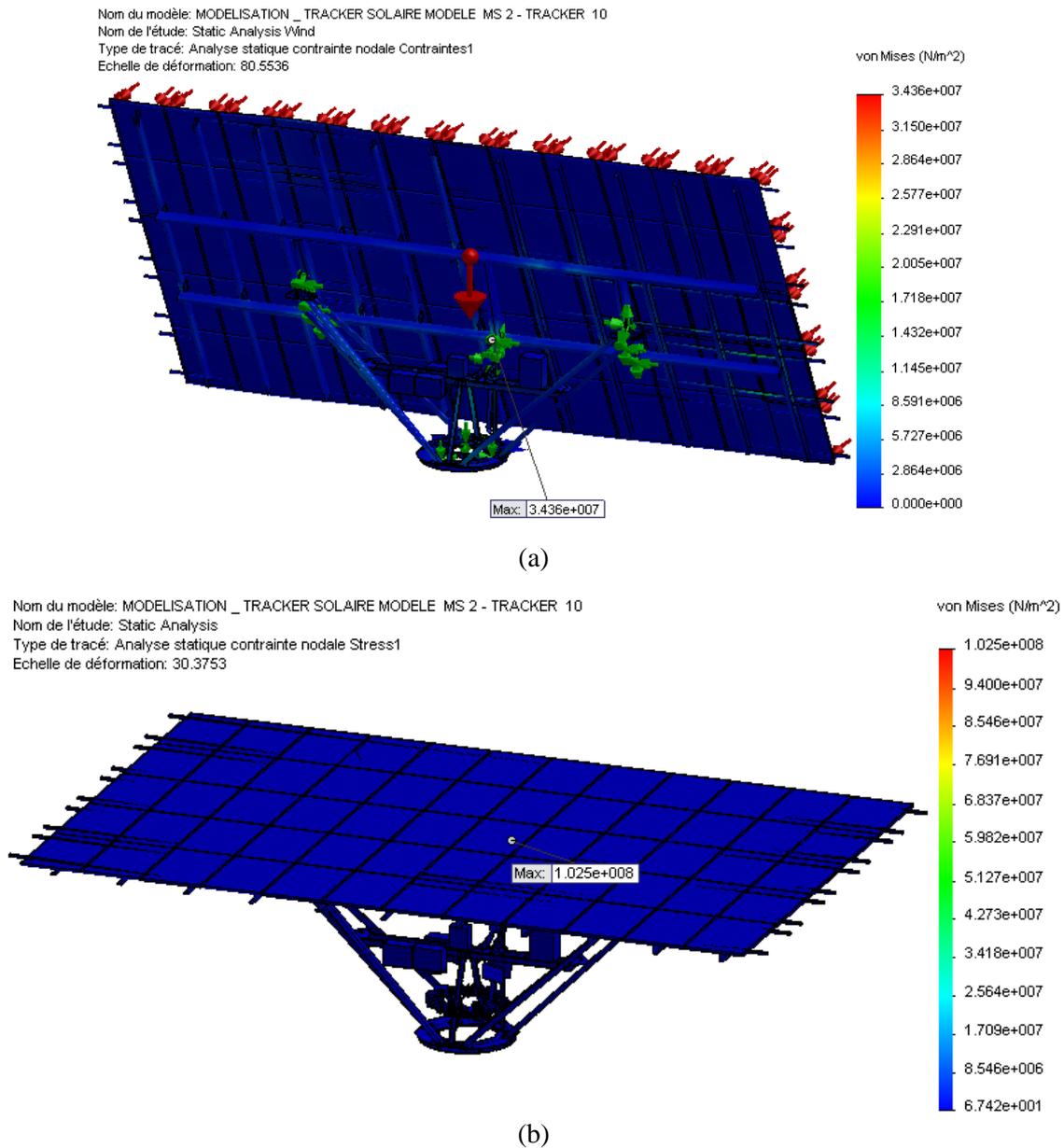
Ce chapitre expose l'analyse et la simulation 3D du comportement statique des deux SSS2 (MS-2 TRACKER10+ & Nouveau prototype) par la MEF. Les systèmes sont soumis à l'effet de gravitation et du chargement critique de la pression du vent de 36m/s (130 km/h) pour les différentes positions d'élévation, qui sont pour le NSSS2 (10°, 20°, 30°, 40° et 50°) et 60° pour le suiveur MS-2 TRACKER10+ ainsi que pour le chargement de la neige pour le cas le plus défavorable sur le territoire algérien (Wilaya de **Médéa** position horizontale à 0°).

Les performances statiques de stabilité et de résistance des deux suiveurs sont appréciées à travers les paramètres caractéristiques des matériaux qui sont : les distributions des contraintes, des déplacements, des déformations et des coefficients de sécurité.

## 5.2 Système de suiveur solaire MS-2 TRACKER 10+

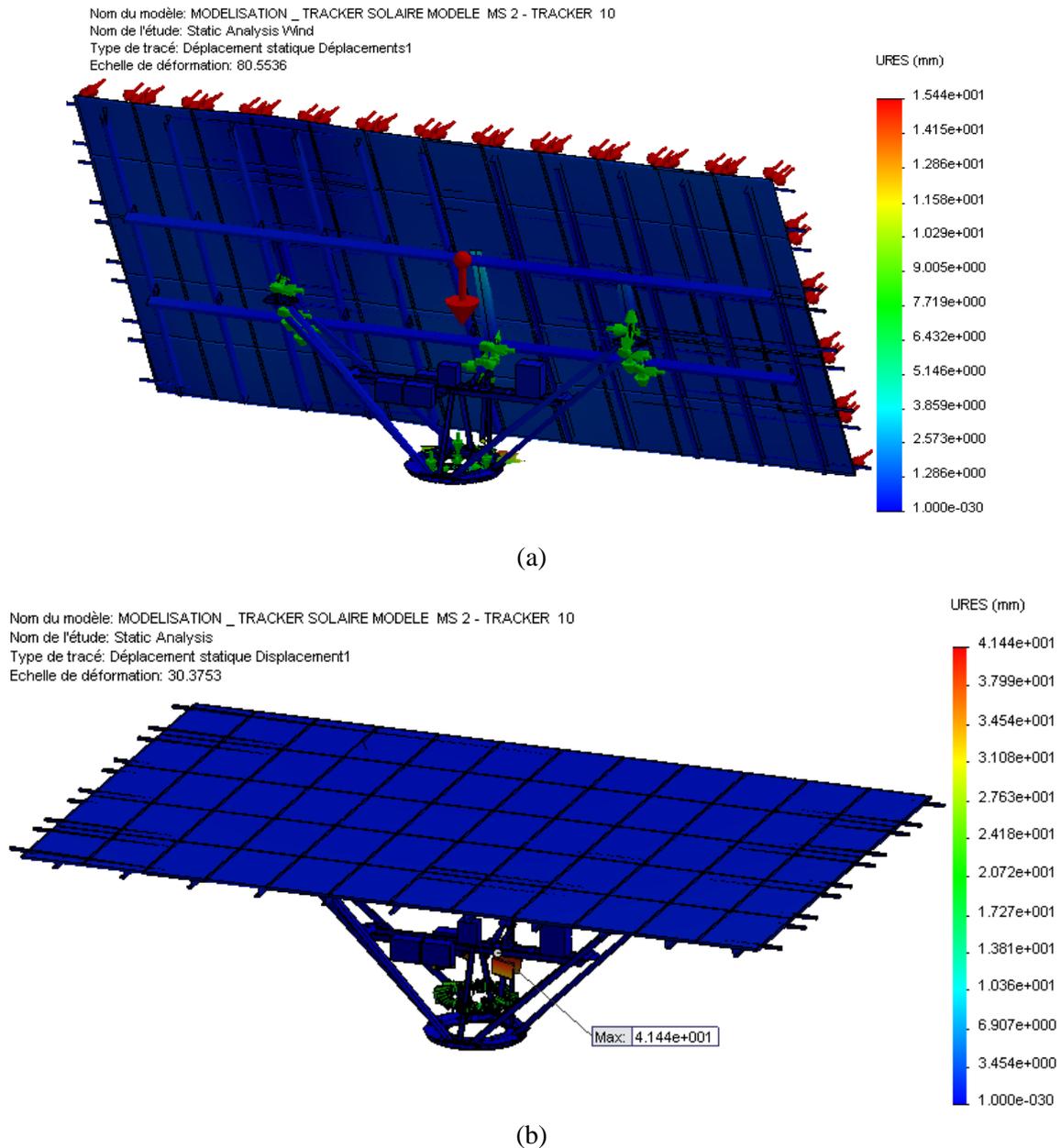
Les résultats de la simulation de l'analyse du comportement statique du système de suiveur MS-2 sont présentés dans les Figures (5.1 à 5.4) et le Tableau (5.1) [FERROUDJI A, 2014].

La Figure (5.1) présente les distributions des contraintes équivalentes de Von Mises dans le système de suiveur. Les contraintes maximales dans les deux cas vent et neige sont de 34.36 et 102.5 MPa respectivement, elles sont distribuées dans la région de contact entre le support de la grille (partie supérieure) du suiveur et les chapes du vérin mécanique d'actionnement électrique (rotation d'altitude). Ces valeurs sont inférieures à la limite élastique du matériau choisi (220.59 MPa).



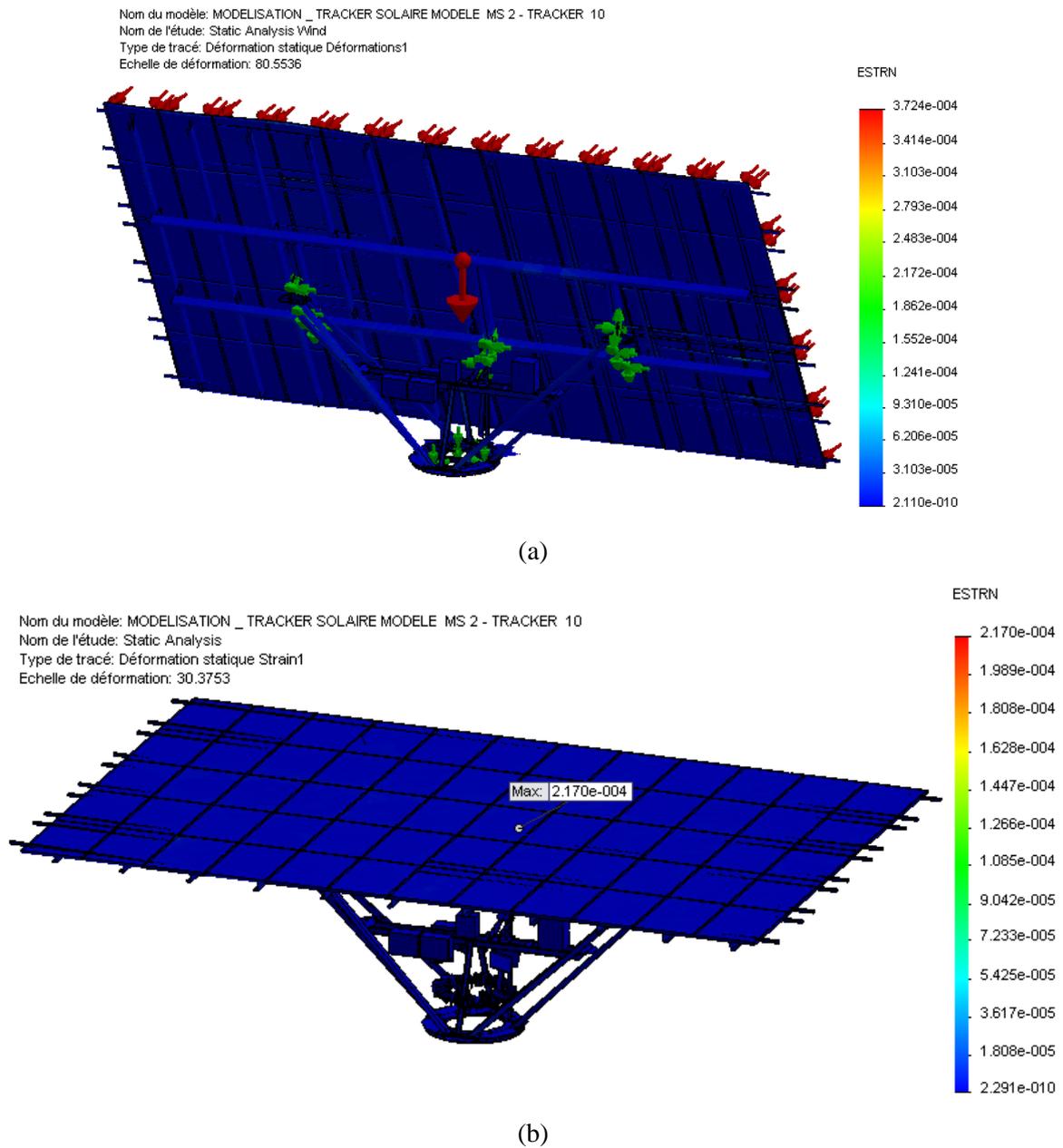
**Figure 5.1 :** Contraintes équivalentes de Von Mises : (a). dues au vent (b). dues à la neige.

Les déplacements critiques montrés sur la Figure (5.2a) de la structure dus au vent sont égaux à 15.44 mm apparaissent aux niveaux de la traverse (cadre principal) du support de la grille de la partie supérieure. Pour les déplacements critiques (Figure 5.2b) de la structure dus à la neige (41.44 mm) apparaissent aux niveaux du support inférieur du déclencheur linéaire (chape de fixation du moteur électrique). Ces déplacements sont acceptables au vu des dimensions des pièces de structure et de l'envergure de l'installation.



**Figure 5.2 :** Déplacements résultants: (a). dus au vent (b). dus à la neige.

Les distributions des déformations équivalentes du système sont représentées sur la Figure (5.3). Les valeurs maximales dans les deux cas vent et neige sont de  $3.72 \times 10^{-4}$  et  $2.17 \times 10^{-4}$  respectivement, qui se trouvent dans la région de contact entre le support de la grille (partie supérieur) et la chape de déclencheur linéaire (rotation d'altitude). Ces valeurs respectent bien l'hypothèse de petites déformations autour de la configuration de référence ( $\varepsilon \ll 1$ ).



**Figure 5.3 :** Distributions des déformations équivalentes : (a). dues au vent (b). dues à la neige.

La Figure (5.4) présente les distributions des coefficients de sécurité de conception du suiveur. Quand les chargements externes sont appliqués, les résultats de CS montrent une valeur minimale de 5.81 pour le cas du vent et de 2.15 pour le cas de la neige. Ces facteurs sont acceptable Ceci indique que le système n'est pas surchargé et que la conception est sûre puisque la valeur de CS est plus grande que 1.0.

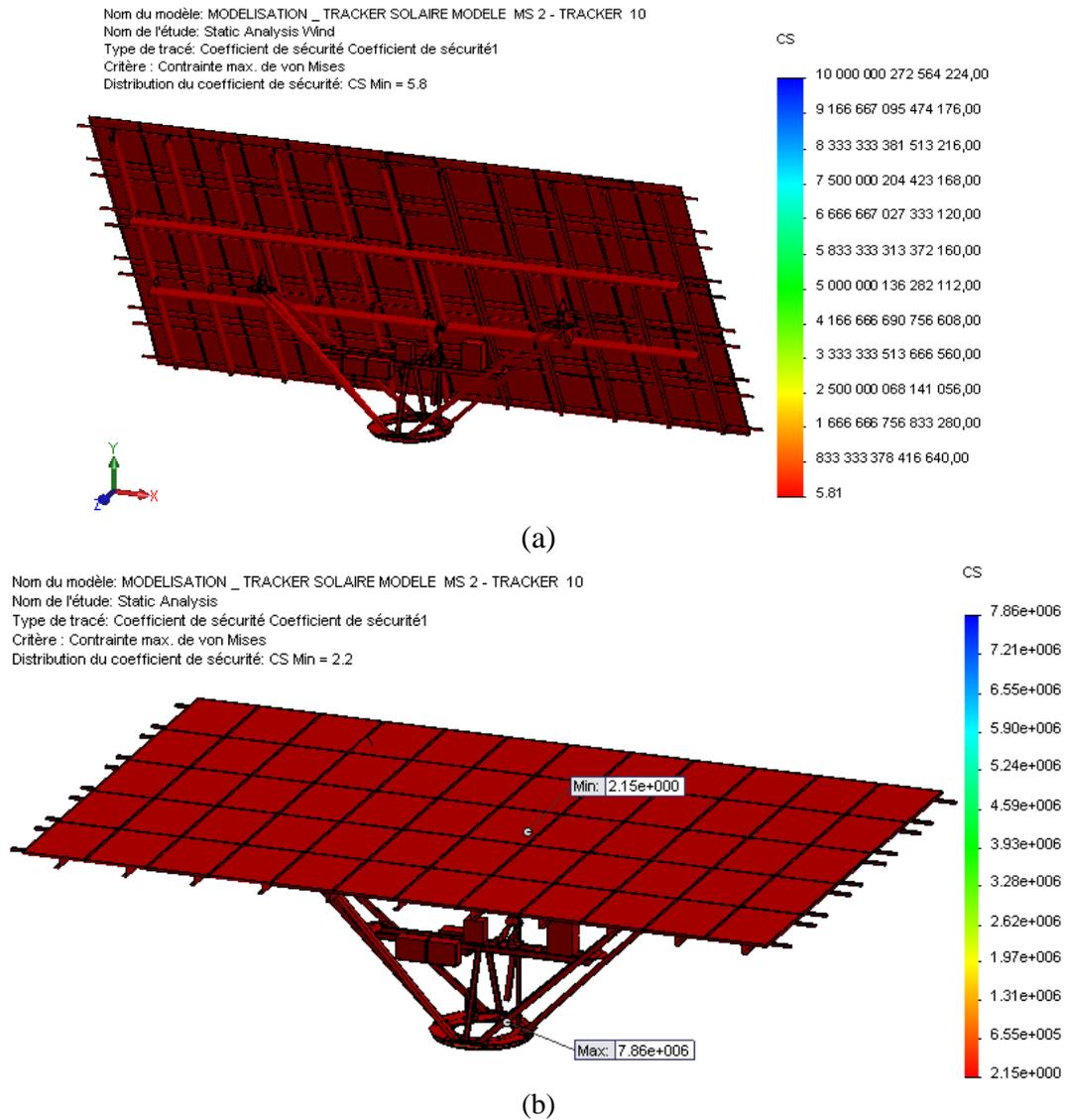


Figure 5.4 : Coefficients des sécurités: (a). dus au vent (b). dus à la neige.

Tableau 5.1 : Résultats de l'analyse statique du système MS-2 TRACKER 10+ - valeurs extrêmes.

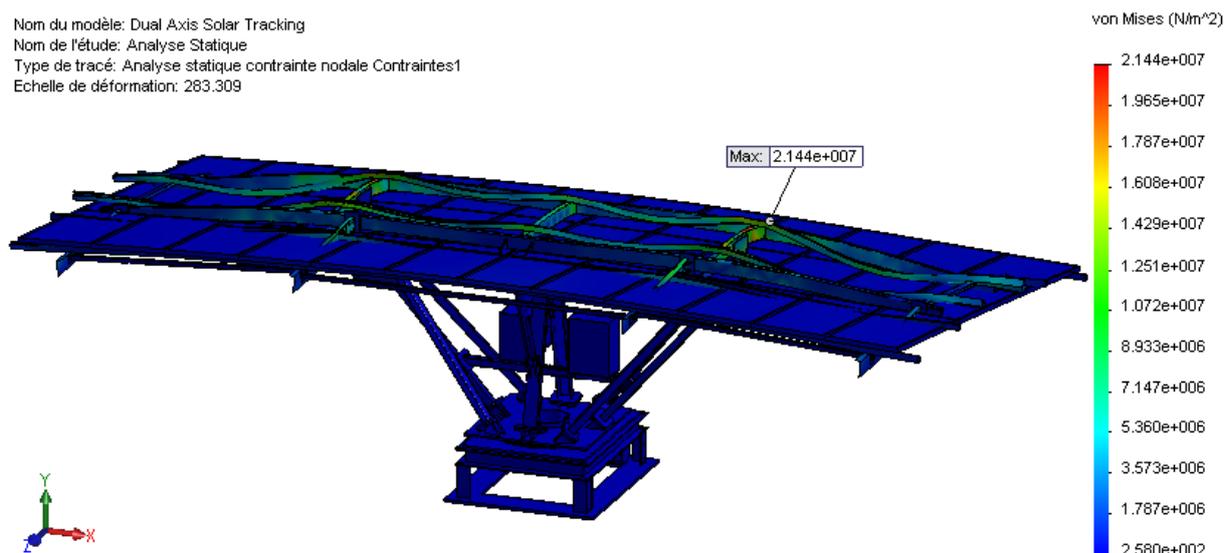
Position	Max. Von-Mises [MPa]	Max. Déplacement [mm]	Max. Déformation [mm]	Coefficient de Sécurité [---]
Au vent $\beta = 60^\circ$	34.36	15.44	$3.72 \times 10^{-4}$	5.81
à la Neige	102.5	41.44	$2.17 \times 10^{-4}$	2.15

Le Tableau (5.1) montre que le système de suiveur MS-2 est plus sollicité au vent lorsqu'il est incliné à une élévation maximale de  $60^\circ$  qu'à la neige lorsqu'il est à la position horizontale. Toutefois, la stabilité mécanique statique du système est permmissible dans les deux situations.

### 5.3 Système du nouveau prototype de suiveur solaire

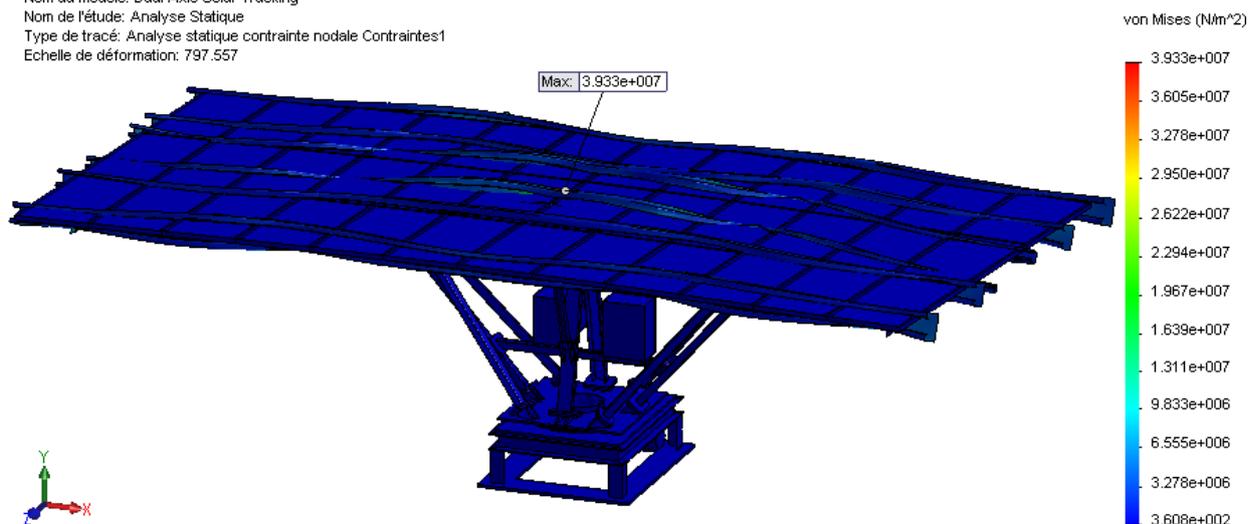
Les résultats de la simulation de l'analyse du comportement statique du NSSS2 sont présentés dans les Figures (5.5 à 5.12) et le Tableau (5.2) [FERROUDJI B, 2014].

Les distributions des contraintes équivalentes de Von Mises dans le NSSS2 dans les deux cas vent et neige sont représentées sur les Figures (5.5 & 5.6). Pour le cas de la neige, les contraintes moyennes sont inférieures à 16 MPa et les contraintes maximales sont 21.44 MPa et sont distribuées dans la région de contact entre le support de la grille et la chape de l'amortisseur hydraulique droite. Pour le cas du vent, les contraintes moyennes sont inférieures à 30 MPa pour les orientations 10°, 20°, 30°, 40°, et moins de 40 MPa pour l'angle d'élévation 50°. Les contraintes maximales sont 39.33, 48.47, 52.03, 57.16 et 74.43 MPa respectivement. Pour les positions 10°, 30° et 50°, les contraintes sont distribuées dans la région de contact entre le support de la grille supérieur et les chapes du vérin hydraulique d'actionnement électrique (rotation d'altitude). Pour l'élévation de 20°, les contraintes maximales apparaissent dans la région de contact entre le support de la grille et la chape de l'amortisseur hydraulique gauche. Mais pour une orientation de 40° les contraintes sont réparties dans la barre en forme U qui supporte le champ photovoltaïque. Ces valeurs sont inférieures à la limite élastique admissible des matériaux utilisés. Ainsi, la structure résiste aux pressions de la neige et du vent.



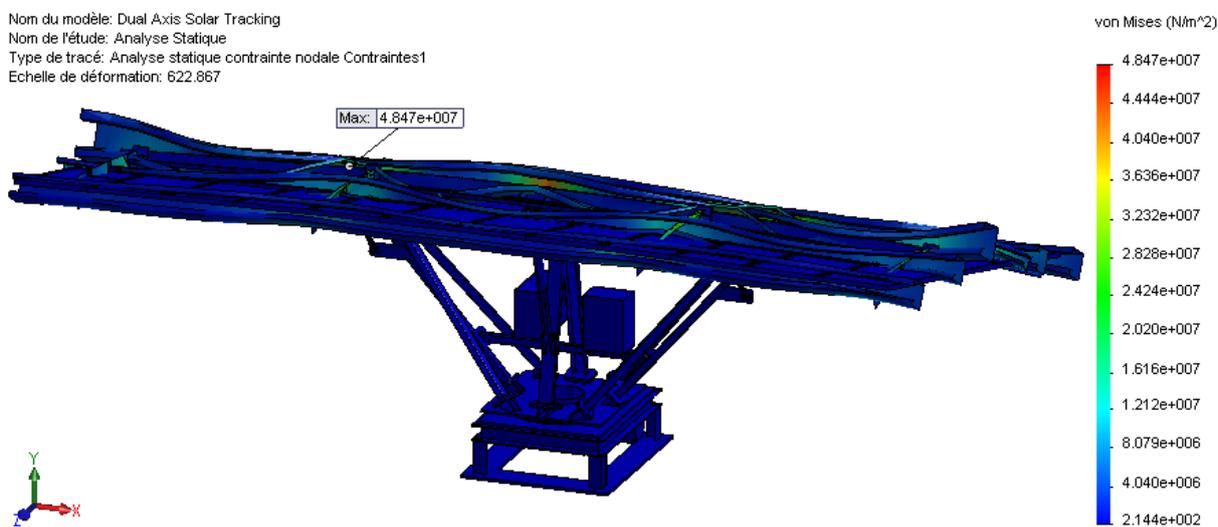
*Figure 5.5 : Contraintes équivalentes de Von Mises dus à la neige.*

Nom du modèle: Dual Axis Solar Tracking  
 Nom de l'étude: Analyse Statique  
 Type de tracé: Analyse statique contrainte nodale Contraintes1  
 Echelle de déformation: 797.557



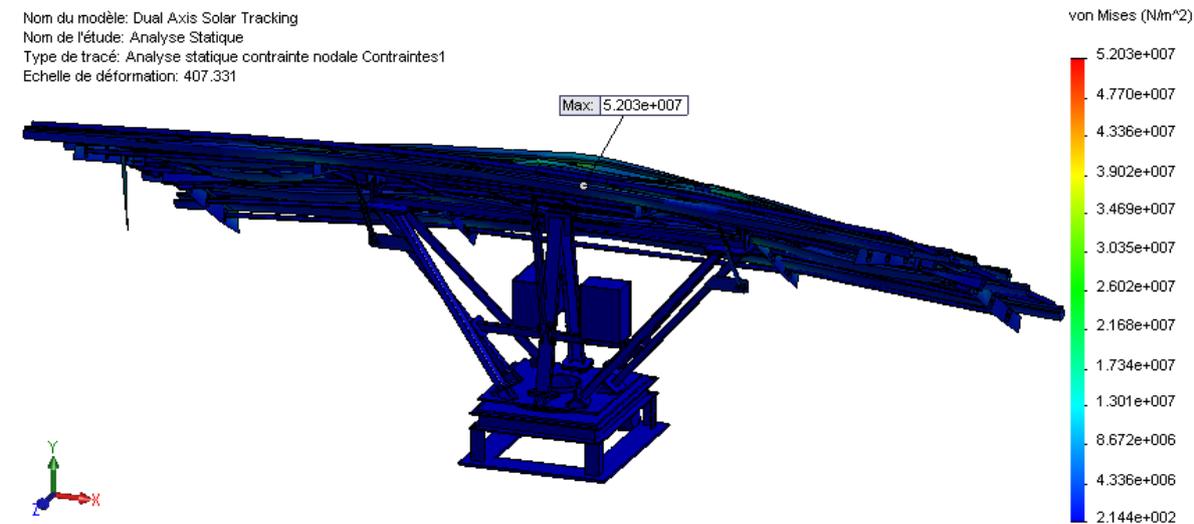
(a) Élévation  $\beta = 10^\circ$

Nom du modèle: Dual Axis Solar Tracking  
 Nom de l'étude: Analyse Statique  
 Type de tracé: Analyse statique contrainte nodale Contraintes1  
 Echelle de déformation: 622.867

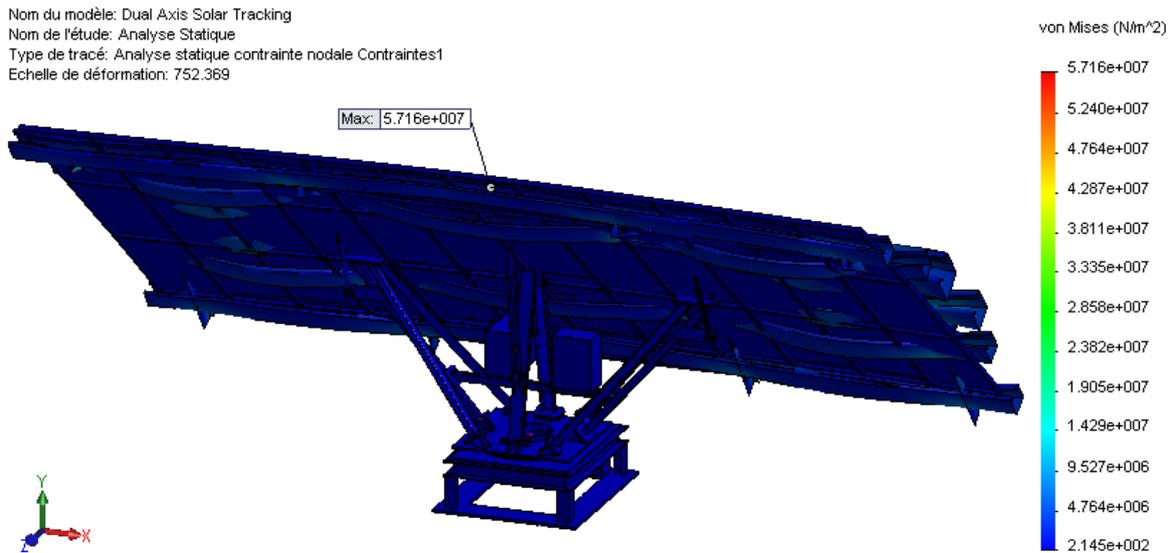


(b) Élévation  $\beta = 20^\circ$

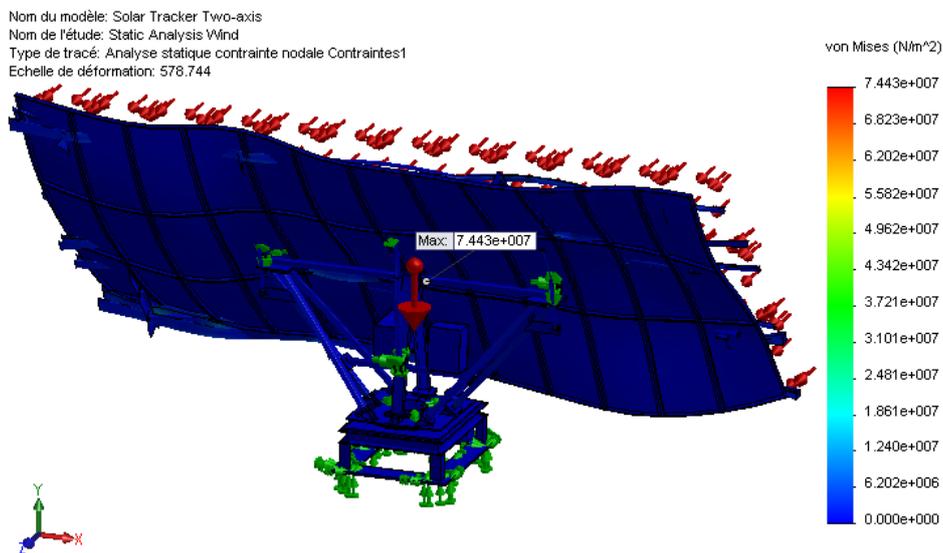
Nom du modèle: Dual Axis Solar Tracking  
 Nom de l'étude: Analyse Statique  
 Type de tracé: Analyse statique contrainte nodale Contraintes1  
 Echelle de déformation: 407.331



(c) Élévation  $\beta = 30^\circ$



(d) Élévation  $\beta = 40^\circ$



(e) Élévation  $\beta = 50^\circ$

**Figure 5.6 :** Contraintes équivalentes de Von Mises dues au vent, (a) Élévation  $\beta=10^\circ$ , (b) Élévation  $\beta=20^\circ$ , (c) Élévation  $\beta=30^\circ$ , (d) Élévation  $\beta=40^\circ$  et (e) Élévation  $\beta=50^\circ$ .

Les Figures (5.7 & 5.8) montrent les déplacements critiques de la structure du NSSS2. Ils apparaissent aux niveaux des extrémités libres de la structure dans le sens longitudinal et dans un degré moindre au niveau des endroits opposés au point de fixation du vérin mécanique et des amortisseurs de la partie supérieure de la structure du suiveur à cause des dispositions des appuis et des chargements externes symétriques. Ces déplacements sont faibles 2.368 mm pour le cas de la neige et sont 0.864, 1.184, 2.130, 0.926 et 1.184 mm respectivement, pour le cas du vent par rapport à la taille de la structure.

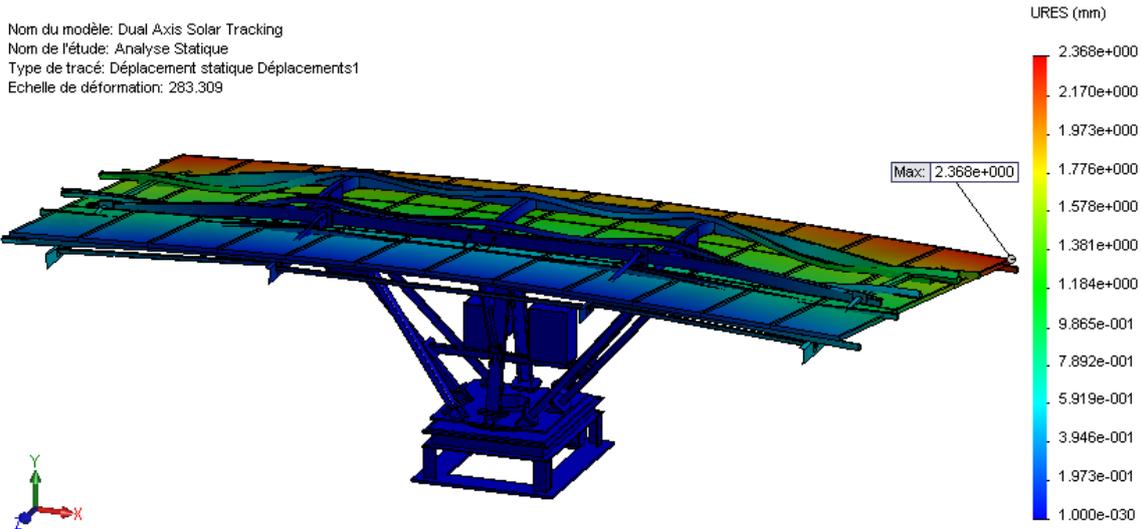
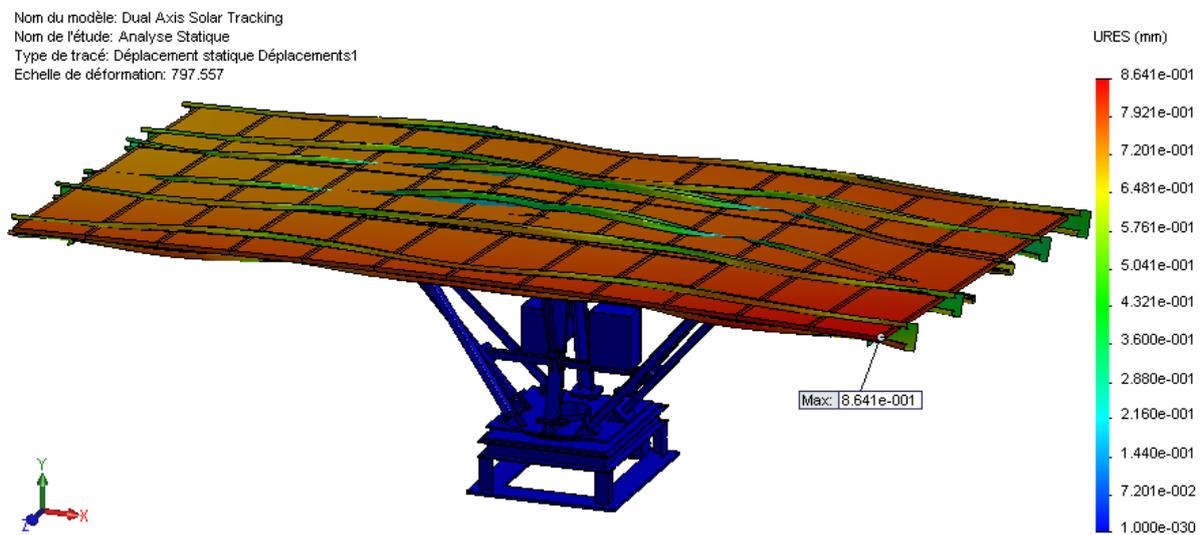
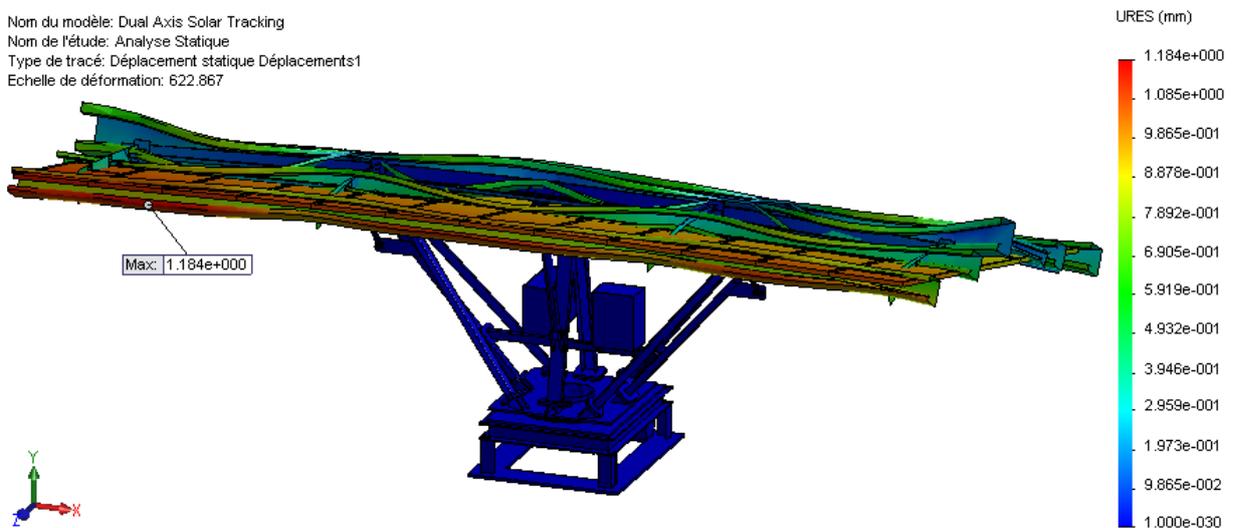


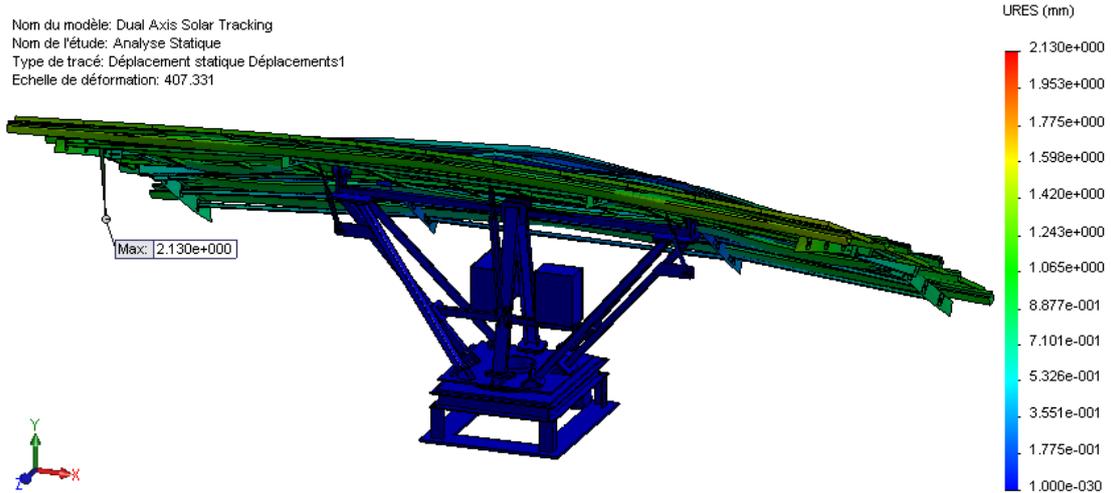
Figure 5.7 : Déplacements résultants dus à la neige.



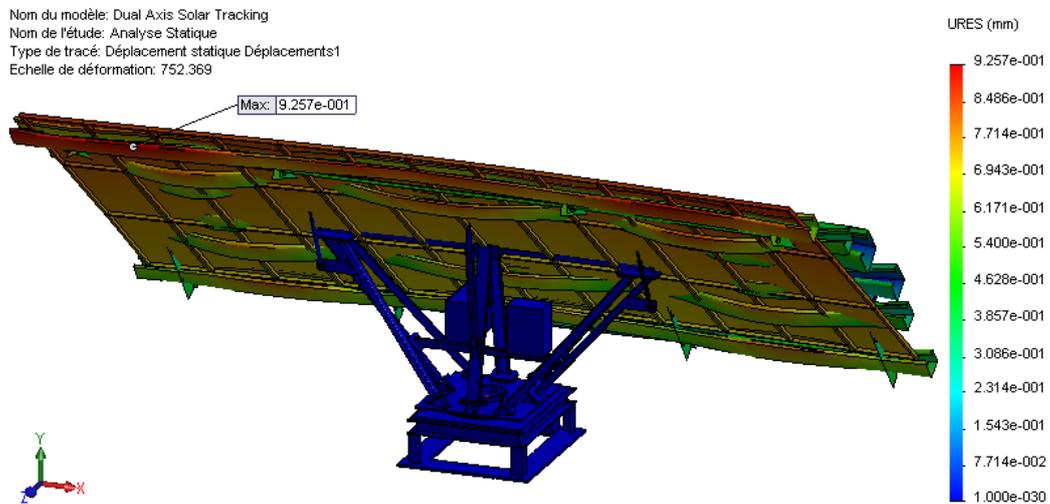
(a) Élévation  $\beta = 10^\circ$



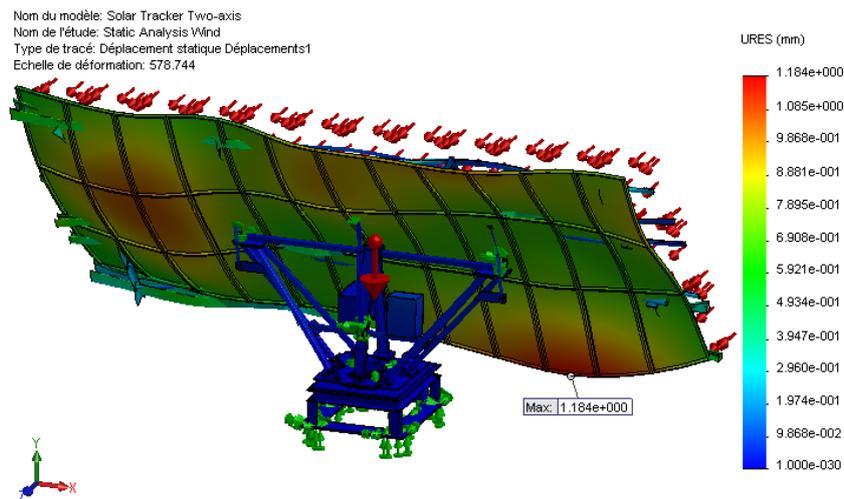
(b) Élévation  $\beta = 20^\circ$



(c) Élévation  $\beta = 30^\circ$



(d) Élévation  $\beta = 40^\circ$



(e) Elévation  $\beta = 50^\circ$

**Figure 5.8 :** Déplacements résultants dus au vent, (a) Élévation  $\beta=10^\circ$ , (b) Élévation  $\beta=20^\circ$ , (c) Élévation  $\beta=30^\circ$ , (d) Élévation  $\beta=40^\circ$  et (e) Élévation  $\beta=50^\circ$ .

Les distributions des déformations équivalentes du système sont représentées sur les Figures (5.9 & 5.10). Le cas de la neige, les valeurs maximales ( $5.127 \times 10^{-4}$ ) sont distribuées dans la position opposée au point de fixation de l'amortisseur gauche. Pour le cas du vent, dans les deux élévations  $10^\circ$  et  $30^\circ$ , les valeurs maximales sont trouvées à la position opposée au point de fixation de l'amortisseur. Pour les orientations  $20^\circ$  et  $40^\circ$ , les valeurs sont distribuées dans la barre en forme de U, qui supporte le champ PV. Mais pour l'angle  $50^\circ$ , la valeur maximale est de  $4.325 \times 10^{-4}$  se trouvant dans la région de contact entre le support de la grille (partie supérieure) et la chape de déclencheur linéaire (rotation d'altitude). Ces valeurs respectent bien l'hypothèse de petites déformations autour de la configuration de référence ( $\epsilon \ll 1$ ).

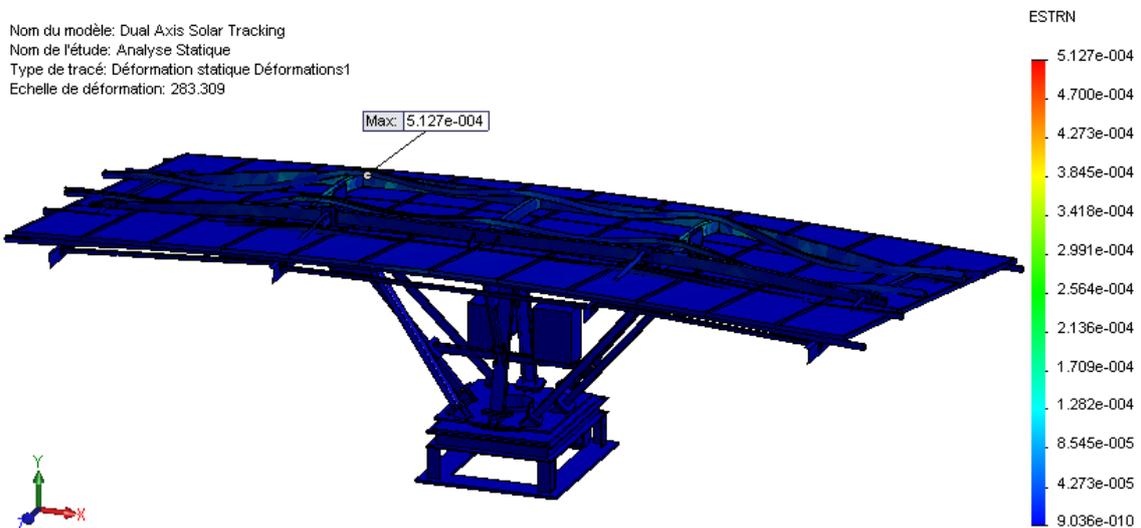
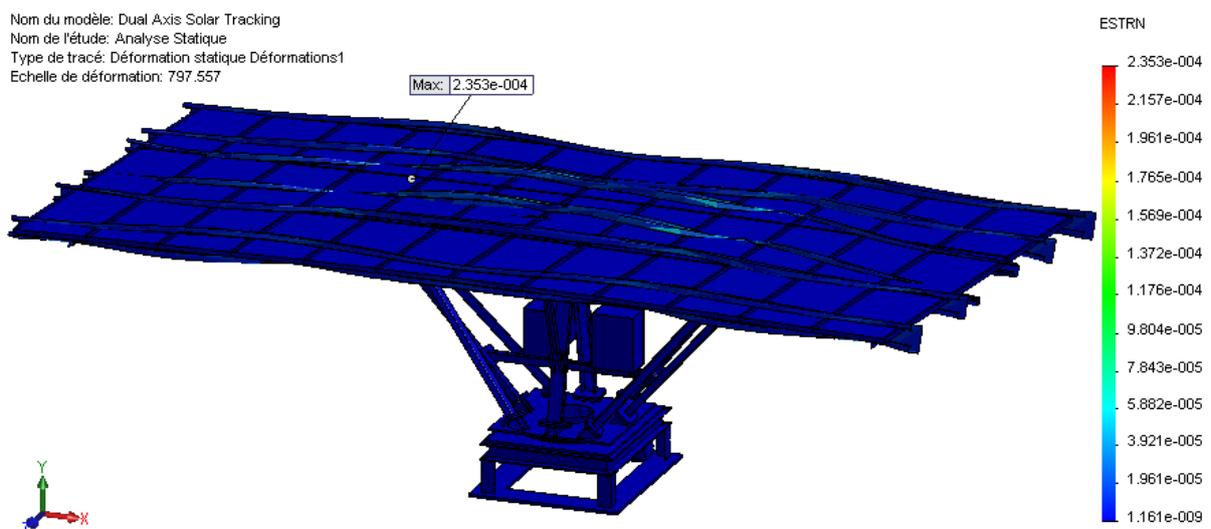
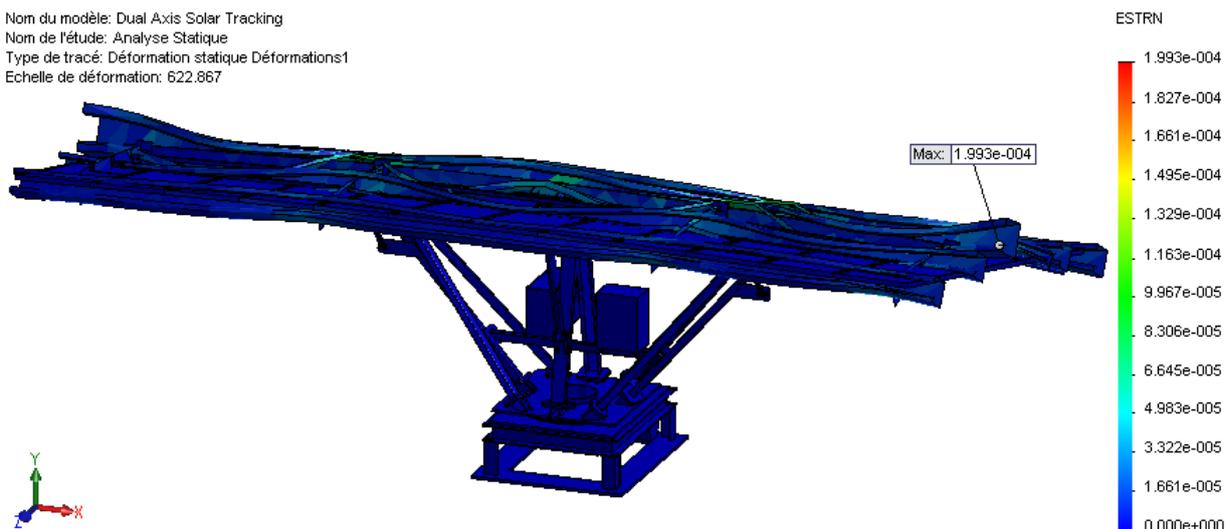


Figure 5.9 : Déformations équivalentes dues à la neige.



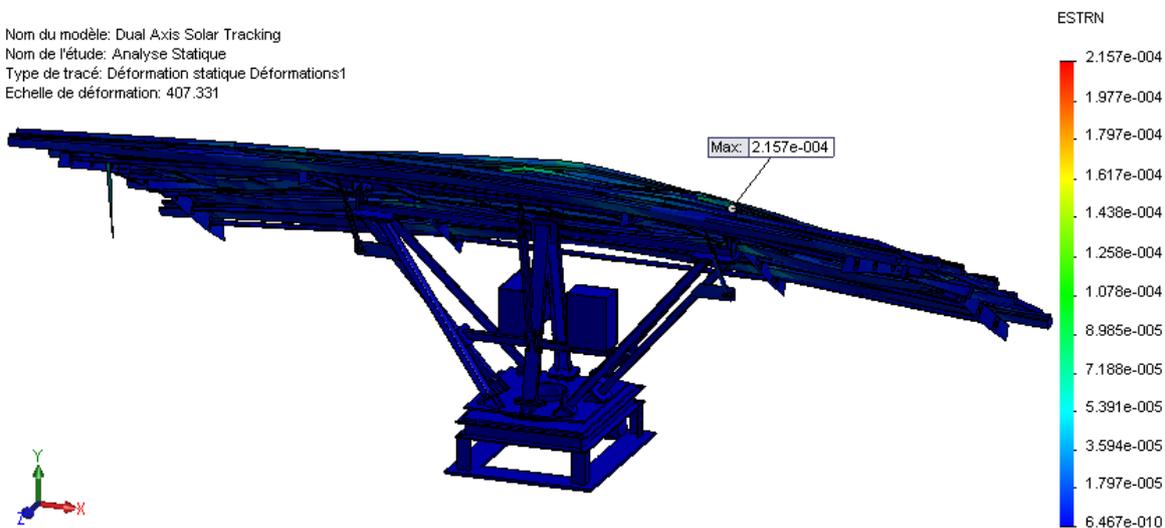
(a) Élévation  $\beta = 10^\circ$

Nom du modèle: Dual Axis Solar Tracking  
 Nom de l'étude: Analyse Statique  
 Type de tracé: Déformation statique Déformations1  
 Echelle de déformation: 622.867



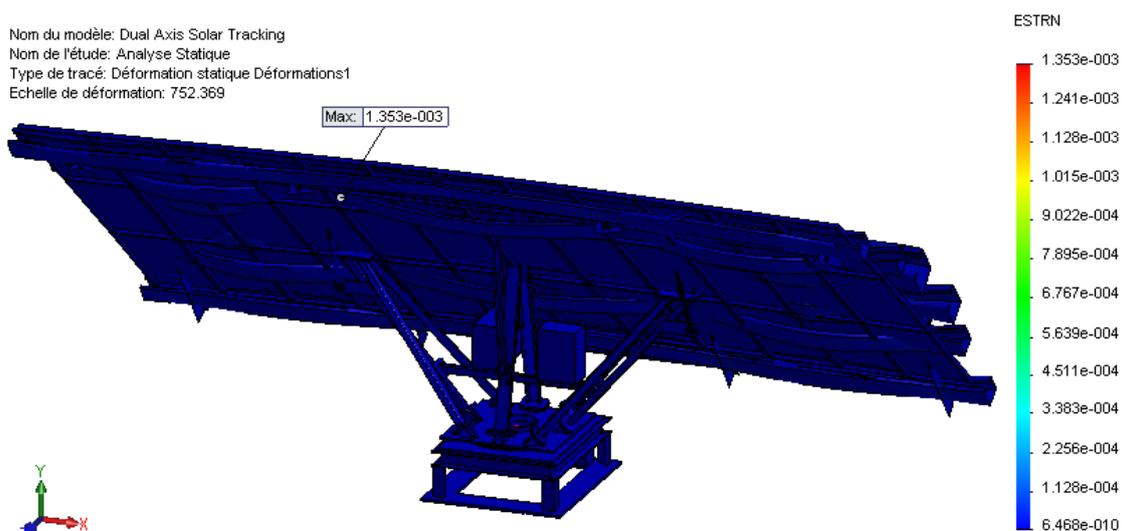
(b) Élévation  $\beta = 20^\circ$

Nom du modèle: Dual Axis Solar Tracking  
 Nom de l'étude: Analyse Statique  
 Type de tracé: Déformation statique Déformations1  
 Echelle de déformation: 407.331

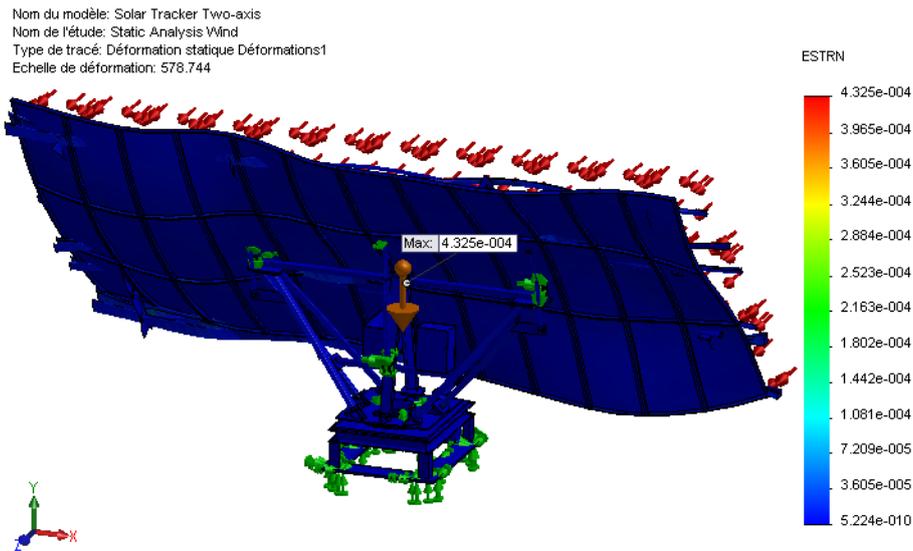


(c) Élévation  $\beta = 30^\circ$

Nom du modèle: Dual Axis Solar Tracking  
 Nom de l'étude: Analyse Statique  
 Type de tracé: Déformation statique Déformations1  
 Echelle de déformation: 752.369



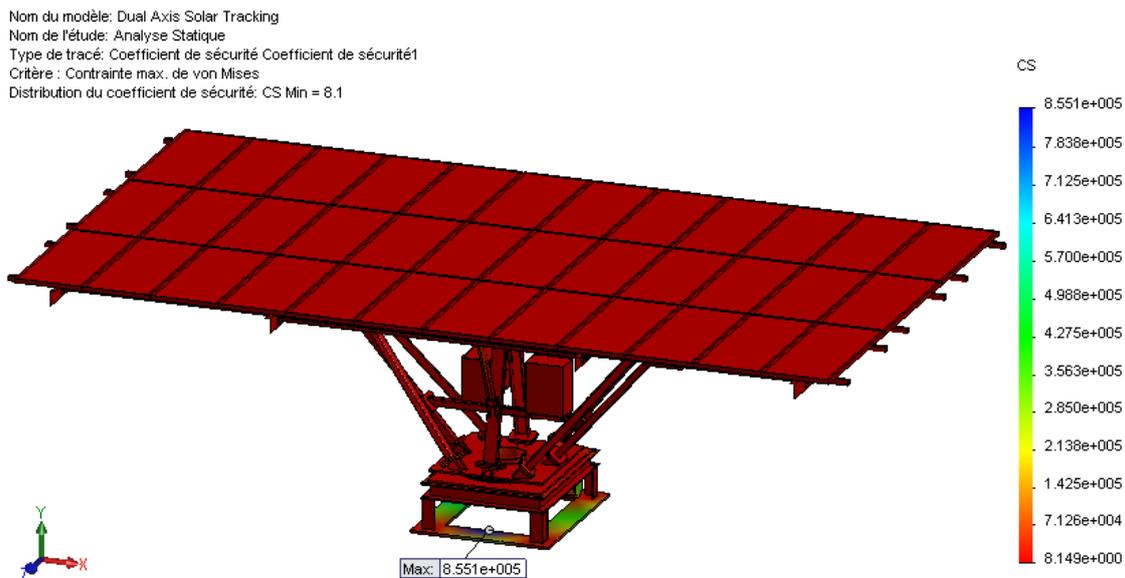
(d) Élévation  $\beta = 40^\circ$



(e) Élévation  $\beta = 50^\circ$

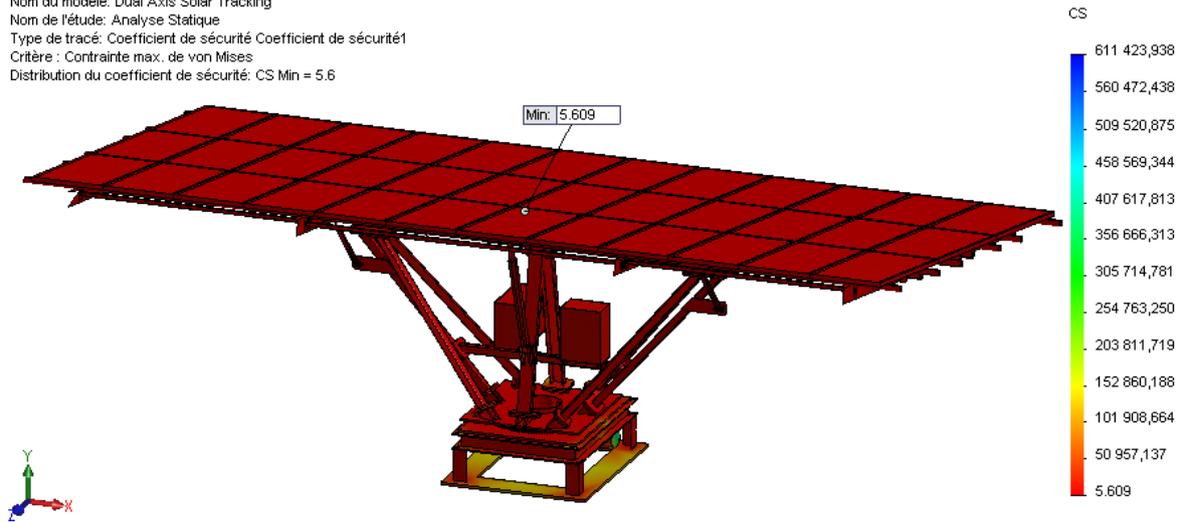
**Figure 5.10 :** Déformations équivalentes dues au vent, (a) Élévation  $\beta=10^\circ$ , (b) Élévation  $\beta=20^\circ$ , (c) Élévation  $\beta=30^\circ$ , (d) Élévation  $\beta=40^\circ$  et (e) Élévation  $\beta=50^\circ$ .

Les distributions des coefficients de sécurité de conception du système sont représentées sur les Figures (5.11 & 5.12). Lorsque les chargements externes sont appliqués, les résultats de CS montrent des valeurs minimales de 8.14 (cette valeur est relativement élevée) pour le cas de la neige et de 5.61, 4.55, 4.24, 3.71 et 2.15 respectivement, pour le cas du vent. Ces facteurs sont acceptables, ce qui indique que le NSSS2 n'est pas surchargé et que la stabilité et la fiabilité de la conception est admissible puisque la valeur de CS est plus grande que 1.0.



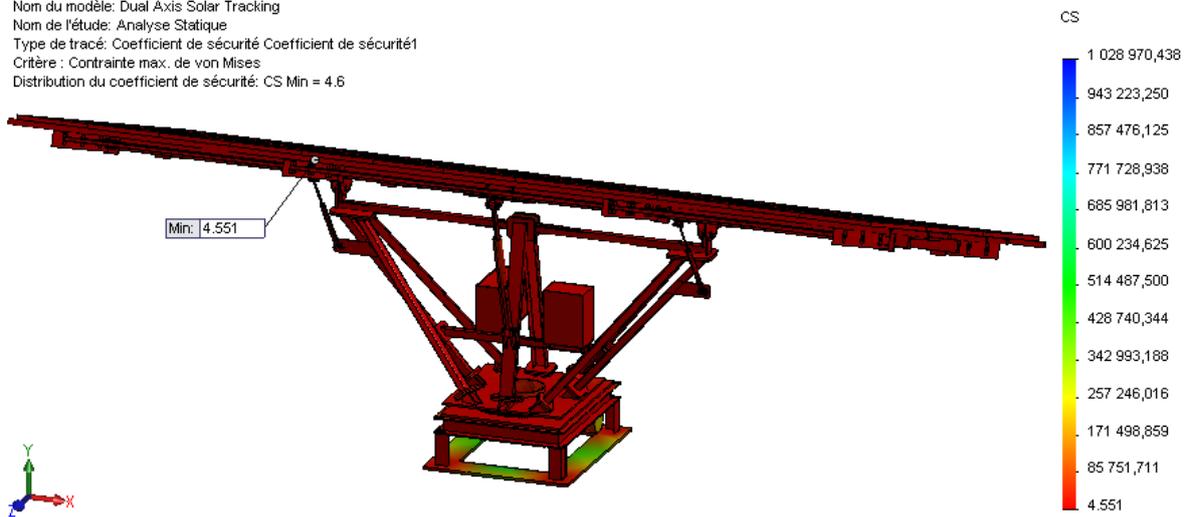
**Figure 5.11 :** Coefficients des sécurités dus à la neige.

Nom du modèle: Dual Axis Solar Tracking  
 Nom de l'étude: Analyse Statique  
 Type de tracé: Coefficient de sécurité Coefficient de sécurité1  
 Critère : Contrainte max. de von Mises  
 Distribution du coefficient de sécurité: CS Min = 5.6



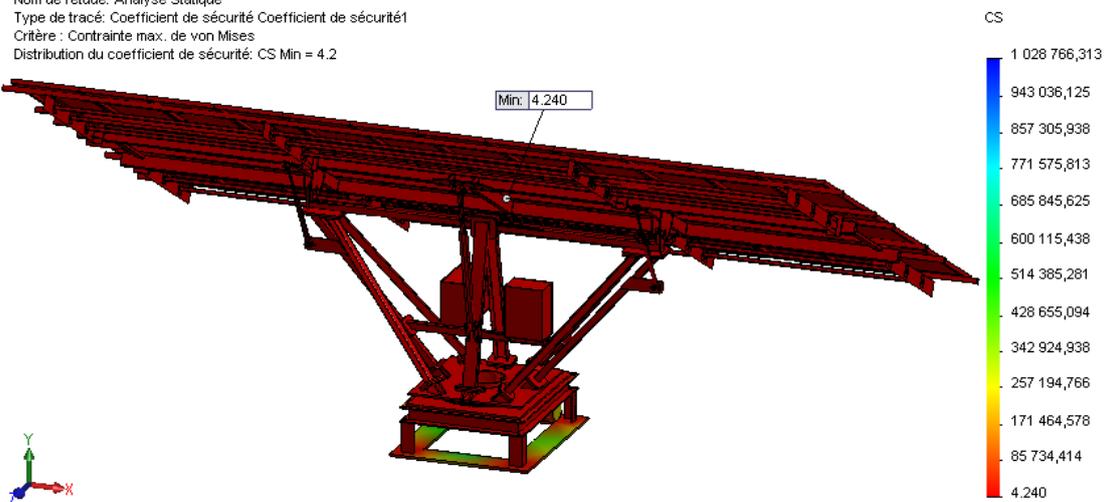
(a) Élévation  $\beta = 10^\circ$

Nom du modèle: Dual Axis Solar Tracking  
 Nom de l'étude: Analyse Statique  
 Type de tracé: Coefficient de sécurité Coefficient de sécurité1  
 Critère : Contrainte max. de von Mises  
 Distribution du coefficient de sécurité: CS Min = 4.6

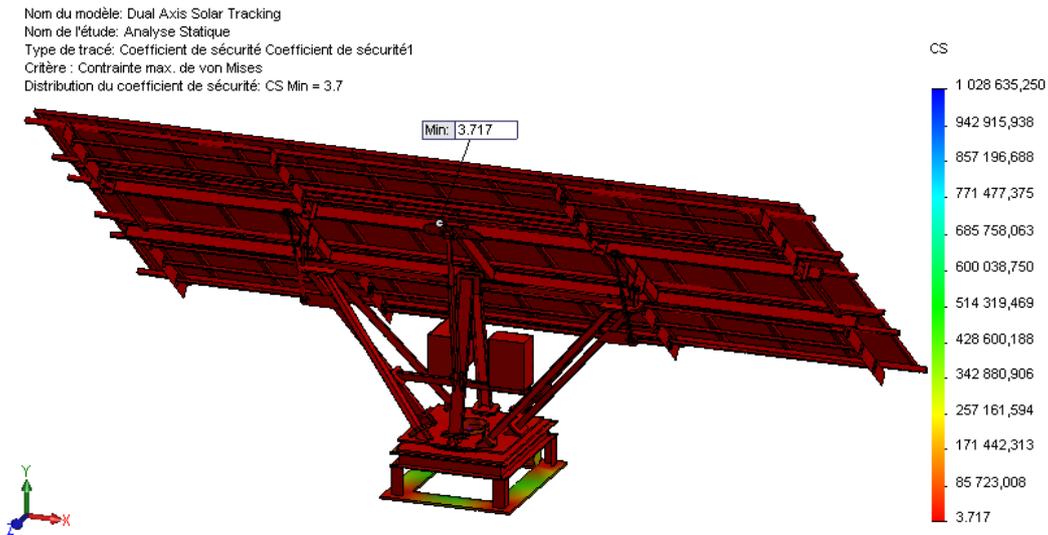


(b) Élévation  $\beta = 20^\circ$

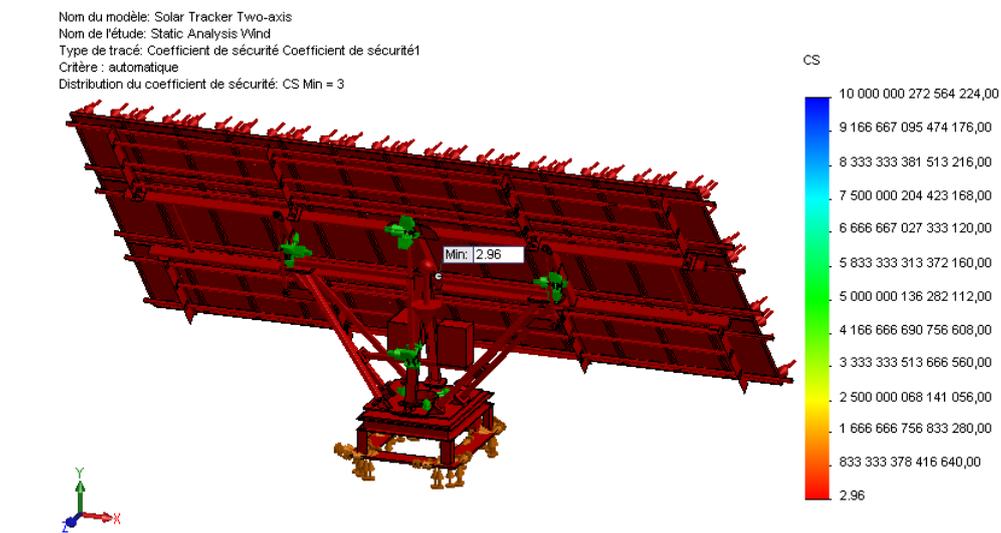
Nom du modèle: Dual Axis Solar Tracking  
 Nom de l'étude: Analyse Statique  
 Type de tracé: Coefficient de sécurité Coefficient de sécurité1  
 Critère : Contrainte max. de von Mises  
 Distribution du coefficient de sécurité: CS Min = 4.2



(c) Élévation  $\beta = 30^\circ$



(d) Élévation  $\beta = 40^\circ$



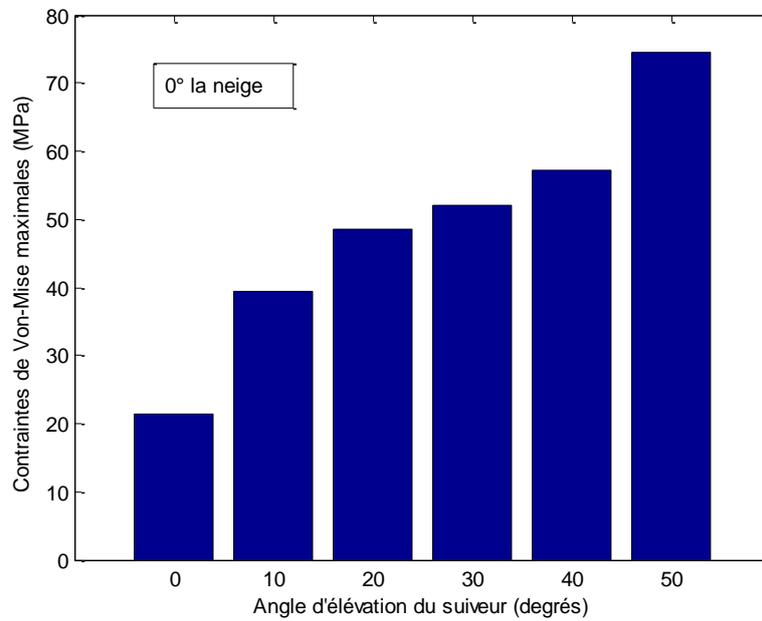
(e) Élévation  $\beta = 50^\circ$

**Figure 5.12 :** Coefficients des sécurités dus au vent, (a) Élévation  $\beta=10^\circ$ , (b) Élévation  $\beta=20^\circ$ , (c) Élévation  $\beta=30^\circ$ , (d) Élévation  $\beta=40^\circ$  et (e) Élévation  $\beta=50^\circ$ .

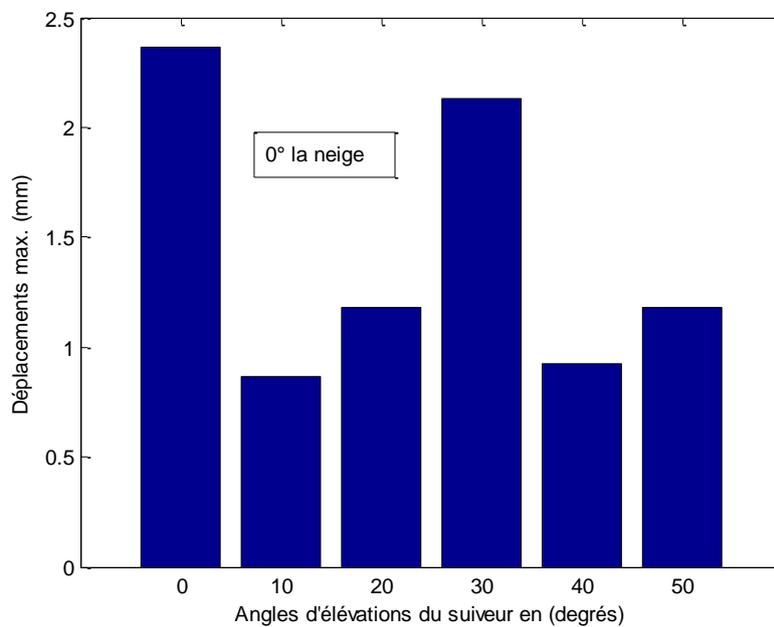
**Tableau 5.2 :** Résultats de l'analyse statique du NSSS2 – valeurs extrêmes.

Position	Max. Von-Mises [MPa]	Max. Déplacement [mm]	Max. Déformation [mm]	Coefficient de Sécurité [---]
à la Neige	21.44	2.368	$5.127 \times 10^{-4}$	8.15
$\beta = 10^\circ$	39.33	0.864	$2.35 \times 10^{-4}$	5.61
$\beta = 20^\circ$	48.47	1.184	$1.99 \times 10^{-4}$	4.55
$\beta = 30^\circ$	52.03	2.13	$2.15 \times 10^{-4}$	4.24
$\beta = 40^\circ$	57.16	0.925	$1.35 \times 10^{-3}$	3.71
$\beta = 50^\circ$	74.43	1.184	$4.32 \times 10^{-4}$	2.96

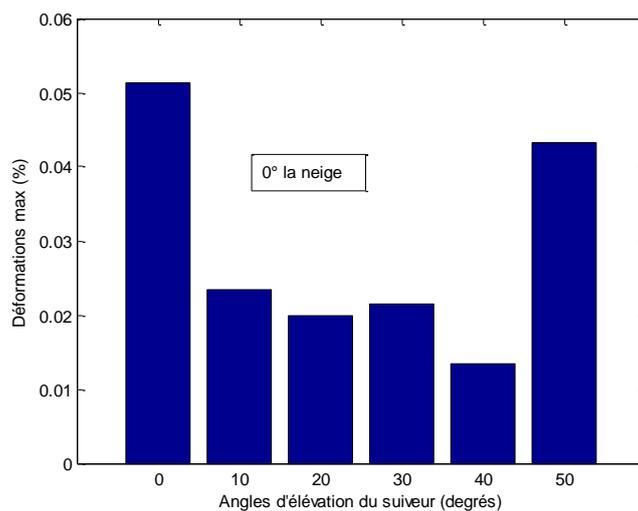
La Figure (5.13) et le Tableau (5.2) montre que le NSSS2 est plus sollicité à la neige lorsqu'il est à la position horizontale qu'au vent lorsqu'il est incliné à une élévation maximale de 50°. Toutefois, la stabilité mécanique statique du système est permmissible dans les deux situations.



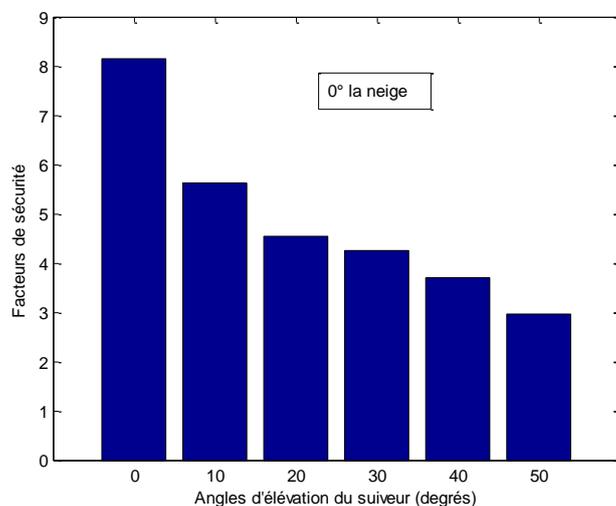
(a) Contrainte de Von Mises



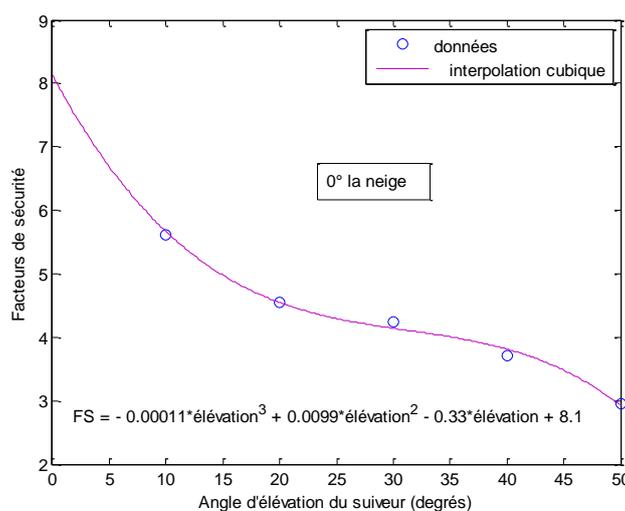
(b) Déplacements résultants



(c) Déformations équivalentes



(d) Facteur de sécurité



(e) Loi de variation du FS en fonction de l'élévation

**Figure 5.13** : Résultats de l'analyse statique du NSSS2 – valeurs extrêmes.

## 5.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de mieux décrire la conception statique 3D par élément finis des deux SSS2 (MS-2 & NSSS2), comprendre leurs déformations élastiques autour de leurs configurations de référence et optimiser leurs géométries et leurs matériaux à travers la modélisation solide et la simulation numérique du processus de leurs conception à travers la prédiction des paramètres mécaniques de résistance et de rigidité soumis à leurs poids propres, aux conditions aux limites et chargements critiques du vent ou de la neige pour les différentes positions opératoires de système solaire en élévations ( $0^\circ$  et  $60^\circ$  pour MS-2 et  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  et  $50^\circ$  pour le NSSS2). Les résultats de simulation des différents cas examinés, montrent que les structures des deux suiveurs sont statiquement stables et les matériaux choisis ont des propriétés mécaniques admissibles du point de vue poids, résistance et flexibilité ainsi que du point de vue usinabilité et disponibilité sur le marché.

L'analyse statique par élément finis 3D a permis de montrer à travers la rigidité, la résistance, la fiabilité et la stabilité mécanique des systèmes. Ainsi, les contraintes équivalentes de Von Mises sont inférieures à la limite élastique du matériau le plus fragile de la structure avec un facteur de sécurité supérieur à 5 pour le cas du vent et supérieur à 2 pour le cas de la neige pour le système MS-2 et un facteur de sécurité supérieur à 3 pour le cas du vent et supérieur à 8 pour le cas de la neige pour le NSSS2. De même les déplacements et les déformations sont acceptables et vérifient aisément le principe de petites déformations autour de la configuration de référence.

*Chapitre***Analyse Dynamique****6****(Modale & Forcée)**

---

**Sommaire**

<b>6.1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>101</b>
<b>6.2</b>	<b>Indices de performance dynamique du nouveau système de suiveur</b> .....	<b>101</b>
6.2.1	Taux de participation massique .....	101
6.2.2	Facteur de qualité de la conception .....	102
6.2.3	Taux spécifiques des amplitudes des modes de résonance .....	102
<b>6.3</b>	<b>Analyse dynamique modale du suiveur</b> .....	<b>102</b>
6.3.1	Modes propres .....	102
6.3.2	Fréquences propres .....	110
6.3.3	Indices de performance dynamique modale du suiveur .....	112
<b>6.4</b>	<b>Analyse dynamique forcée du suiveur</b> .....	<b>115</b>
6.4.1	Modes et indices de performance dynamique forcée du suiveur .....	115
6.4.2	Contraintes équivalentes de Von Mises .....	126
6.4.3	Déplacements résultants .....	128
<b>6.5</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>130</b>

---

## 6.1 Introduction

Ce chapitre reprend les principaux résultats et discussions concernant la simulation dynamique modale et forcée du NSSS2 sous de perturbation harmonique du motoréducteur et sous l'effet des charges dynamiques critiques du vent le cas le plus défavorable sur le territoire algérien (Wilaya de **Djelfa** 112 km/h) et de la neige. Cette analyse permet la prédiction des paramètres modaux et des conditions de résonances de la structure. Ces paramètres structurels (fréquences, amortissements et modes propres de déformation, ...etc.) aident à fixer les performances dynamiques souhaitées pour des fins de stabilité et de fiabilité du système pendant la durée de service prévue [GAW, 2008].

## 6.2 Indices de performance dynamique du nouveau système de suiveur

Les principaux indicateurs de performances dynamiques du NSSS2 sont :

### 6.2.1 Taux de participation massique

Le Taux (facteur) de Participation Massique (TPM) effective représente le pourcentage de la masse du système qui participe à un mode particulier. Il fournit une mesure de l'énergie contenue dans chaque mode de résonance. Un mode avec un grand TPM contribue généralement de façon significative à la réponse dynamique d'un système.

SOLIDWORKS/Simulation établit la liste des TPM des directions normalisées globales X, Y et Z de la structure. Cette condition est basée sur un mouvement de base de la structure dans une direction donnée et le calcul de mouvement de base en raison de cette charge. La solution à l'état stable dans ce cas n'implique pas amortissement ou efforts élastiques. Par conséquent, les équations de réponse modale pour un mouvement de base de la structure dans la direction X peuvent être écrites comme la formule :

$$\ddot{u}_r = u_{rX} \quad (6.1)$$

Les forces d'inertie des points nodaux et le mode propre dans la même direction sont donnés par l'expression :

$$F_{Xr} = M\ddot{u}(t) = u_{rX}M\psi_r \quad (6.2)$$

Le mouvement de base résistant à la direction X de mode  $r^{th}$  est la somme de toutes les forces du point de nœuds ou  $\ddot{u}_r^2$ . Le cisaillement de base total dans la direction X, y compris les  $n$  modes, sera :  $S_X = \sum_{r=1}^N p_{rX}^2$ . Pour un mouvement de base de la structure dans toutes les directions, le mouvement de base exacte doit être égale la somme de tous les éléments de la

masse dans cette direction. Alors, le rapport de participation massique a été défini comme la masse participante divisée par la masse totale dans cette direction donnée dans [EDW, 2002] comme la forme suivante [WIL, 2002 & KHÉLIFI A, 2014] :

$$\begin{cases} X_{mass} = \sum_{r=1}^n u_{rX}^2 / \sum m_X, Y_{mass} = \sum_{r=1}^n u_{rY}^2 / \sum m_Y, Z_{mass} = \sum_{r=1}^n u_{rZ}^2 / \sum m_Z, \\ R_{mass} = \sqrt{X_{mass}^2 + Y_{mass}^2 + Z_{mass}^2} \end{cases} \quad (6.3)$$

Si tous les modes propres sont utilisés, le TPM vaut 1.

### 6.2.2 Facteur de qualité de la conception

Le rapport  $R_d$  (section 2.7.1) est appelé aussi dans la littérature facteur de qualité  $Q$ . En dynamique des structures, la notion du facteur de qualité (**amplification dynamique**) est très importante. Il est défini comme étant le taux d'énergie totale perdue sous différentes formes au cours d'un cycle de vibration. Ce facteur peut être estimé en utilisant l'amplitude dynamique maximale divisée par  $\sqrt{2}$  qui fixe les fréquences à proximité de la fréquence de résonance [JAN, 2007 & KLA, 2012].

$$Q_r = \frac{4\omega_r^2}{\omega_b^2 - \omega_a^2} \cong \frac{\omega_r}{\Delta\omega_r} = \frac{1}{2\xi_r} \quad (6.4)$$

Pour les structures faiblement amorties  $\xi_r = 0.01 - 0.1$ , le facteur de qualité se trouve dans l'intervalle  $5 \leq Q_r \leq 50$ . Le facteur d'amortissement peut être approximé par l'expression [ABD, 2008] :

$$\xi_r = 1/(10 + 0.05\omega_r) \quad (6.5)$$

### 6.2.3 Taux spécifiques des amplitudes des modes de résonance

Tant que la masse généralisée, la force et l'amortissement pour tous les modes sont identiques, les relations suivantes existent entre les réponses et les fréquences naturelles :

$$|A_r|_{max}/|A_1|_{max} = \Omega_1^2/\Omega_r^2 \quad (6.6)$$

## 6.3 Analyse dynamique modale du suiveur

En analyse dynamique modale, nous procédons d'une manière similaire à l'analyse statique sauf que le système doit être considéré libre de tout changement.

### 6.3.1 Modes propres

Les résultats de simulation des quatre premiers modes propres de vibration du NSSS2 pour les six positions en élévation ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  et  $50^\circ$ ) sont montrés sur les Figures (6.1)

à (6.6) ci-dessous. Ces résultats indiquent que la partie supérieure du système de suiveur est la zone la plus sollicitée quel que soit la position du système, le support principal en V et la base du suiveur restent rigides sous tous les modes de vibration. L'analyse montre que la déformation mécanique de la structure du NSSS2 apparaît dans les extrémités de la partie supérieure, libre de toutes liaisons susceptibles de limiter son flexibilité. C'est parce que la structure du suiveur est discontinue dans cette région et caractérisée par une rigidité relativement faible. L'examen des modes propres prédits par simulation pour les différentes positions du NSSS2 montre :

- A l'exception du mode 7, tous les modes de vibration sont des modes de flexion autour de l'axe Z en phase ou en opposition de phase dans le plan XY. Deux à deux, ces modes sont des paires conjugués. Ce résultat est en bonne concordance avec la théorie. Les déformées modales augmentent avec l'augmentation de l'angle d'élévation sous l'effet de déflexion du support du suiveur.
- Le mode 7 est un mode de torsion du système de suiveur autour de la direction X dans le plan YZ.

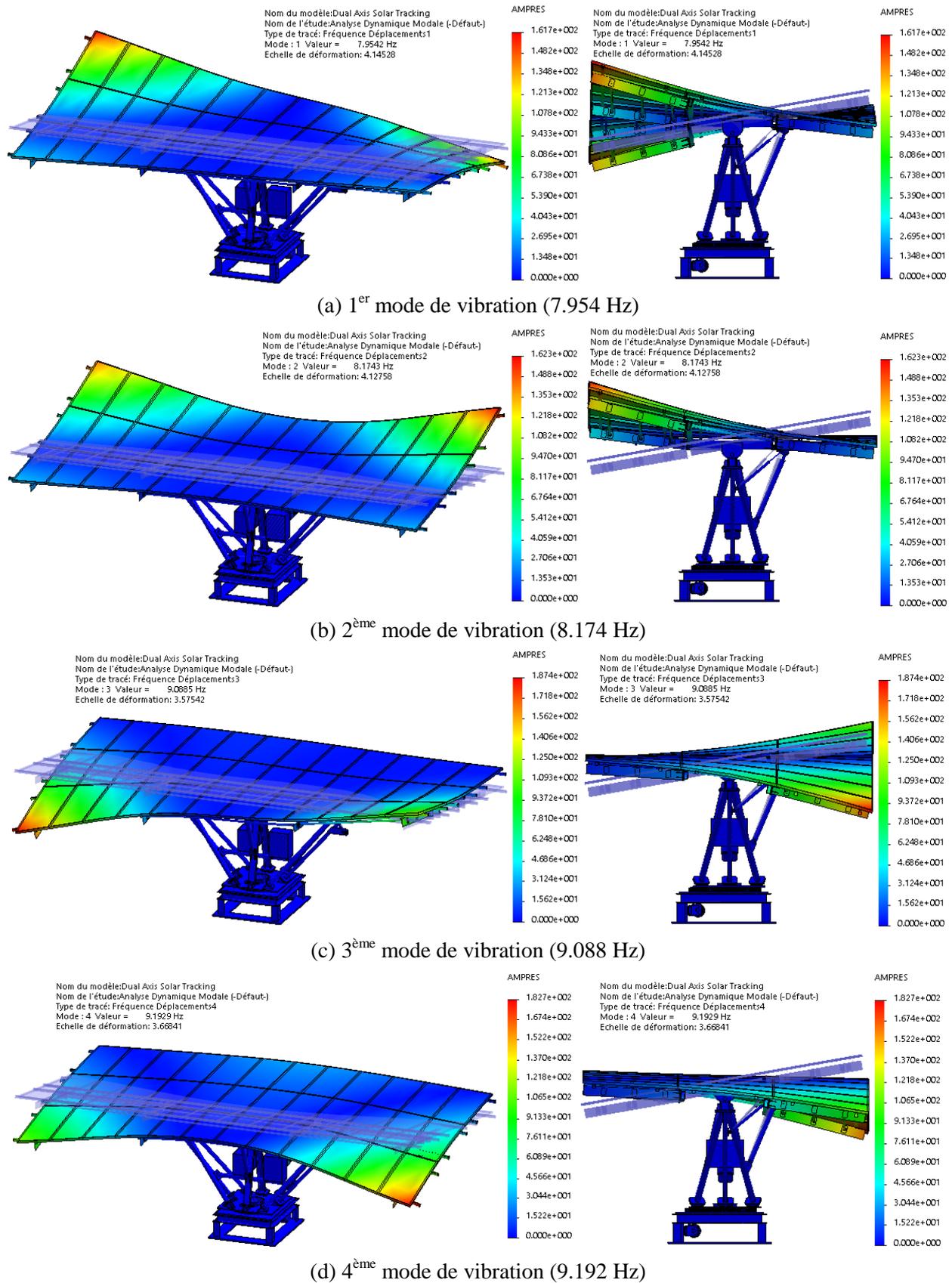
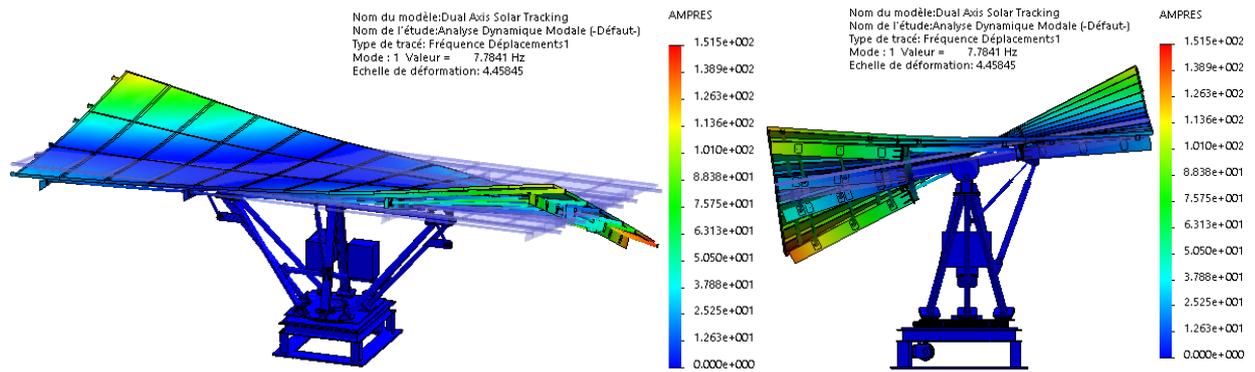
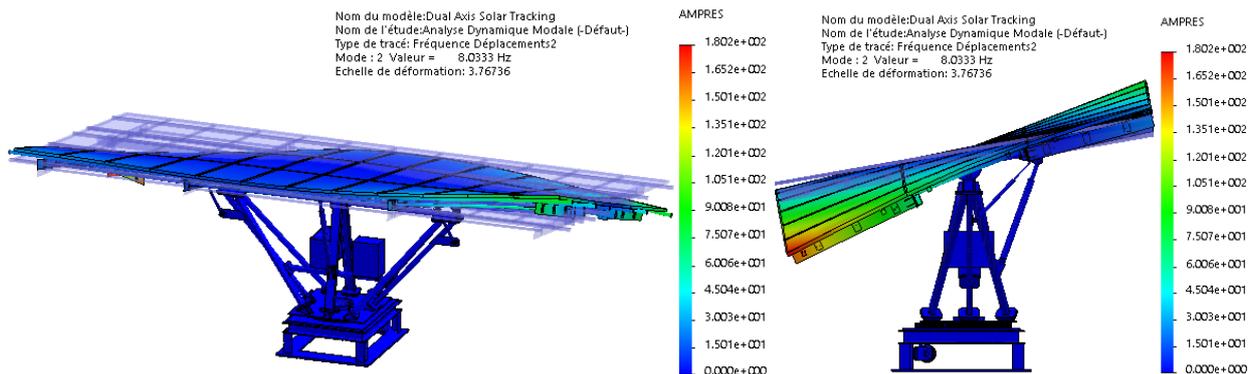


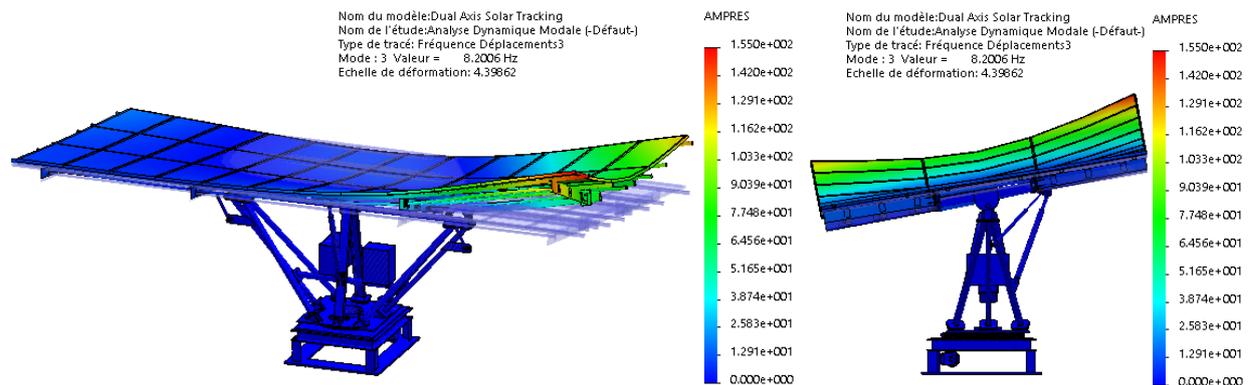
Figure 6.1 : Prédiction des quatre premiers modes de vibration du suiveur – Position  $\beta = 0^\circ$ .



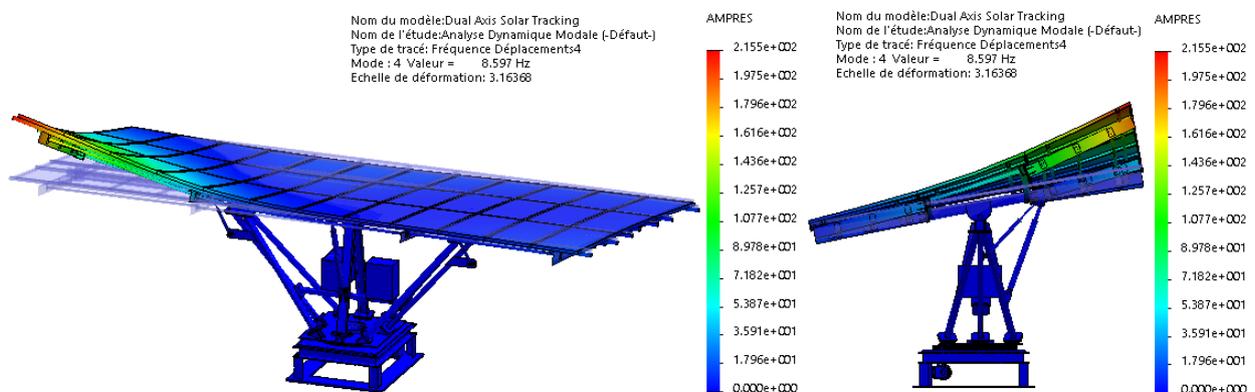
(a) 1<sup>er</sup> mode de vibration (7.784 Hz)



(b) 2<sup>ème</sup> mode de vibration (8.033 Hz)

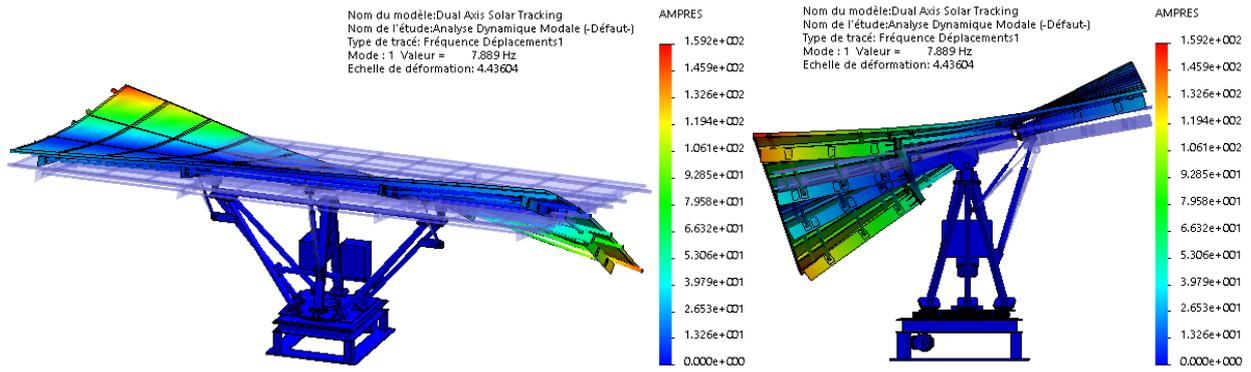


(c) 3<sup>ème</sup> mode de vibration (8.200 Hz)

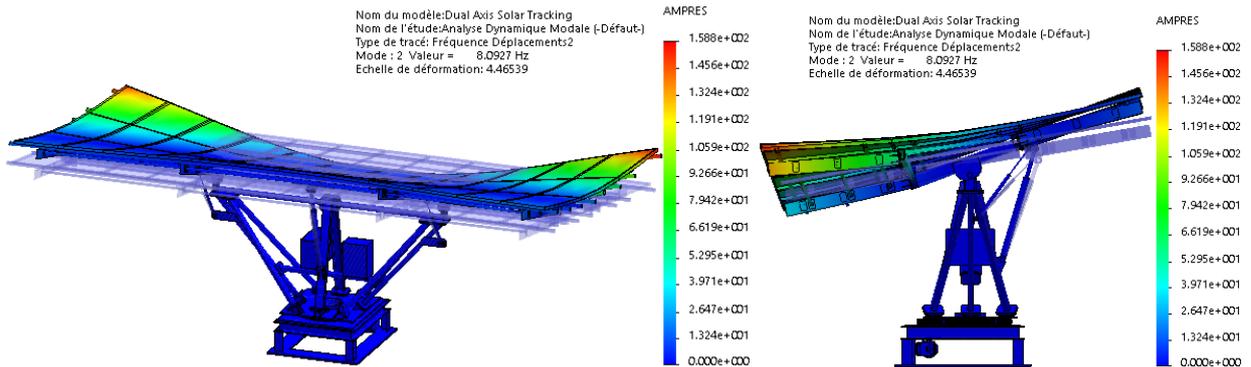


(d) 4<sup>ème</sup> mode de vibration (8.597 Hz)

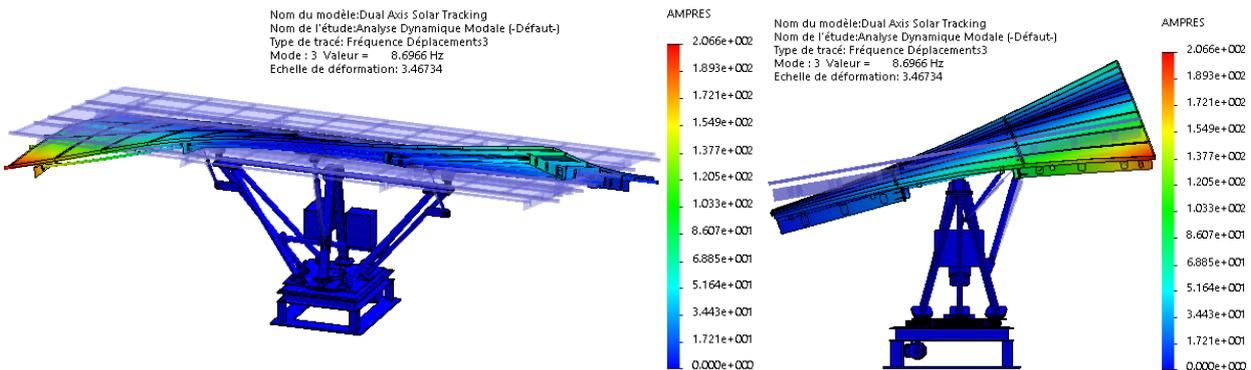
Figure 6.2 : Prédiction des quatre premiers modes de vibration du suiveur – Position  $\beta = 10^\circ$ .



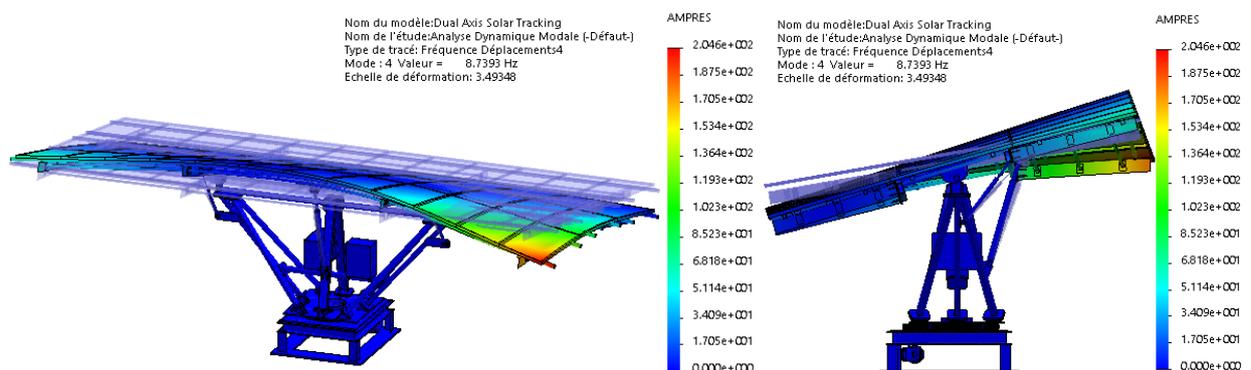
(a) 1<sup>er</sup> mode de vibration (7.889 Hz)



(b) 2<sup>ème</sup> mode de vibration (8.092 Hz)

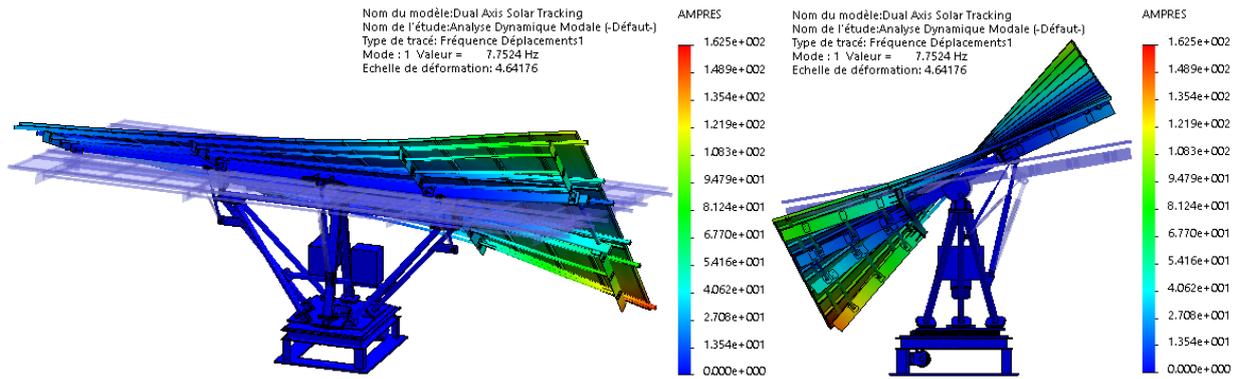


(c) 3<sup>ème</sup> mode de vibration (8.696 Hz)

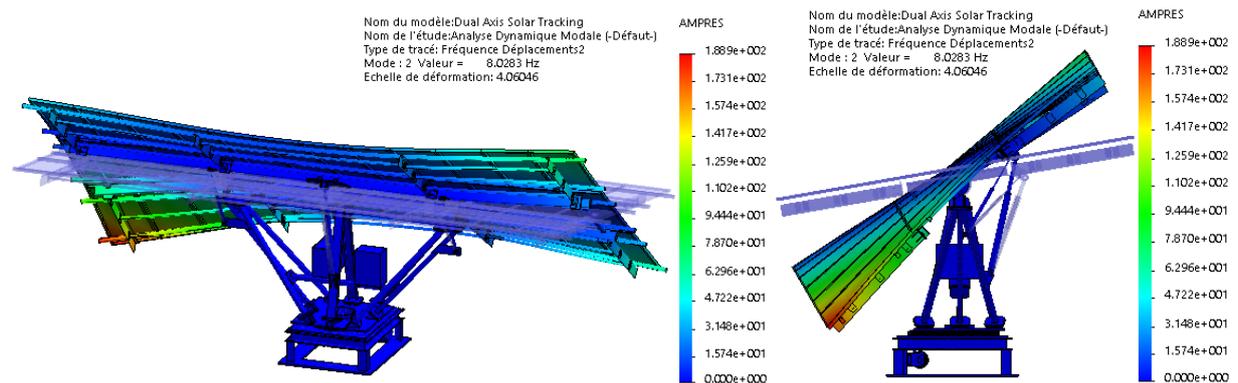


(d) 4<sup>ème</sup> mode de vibration (8.739 Hz)

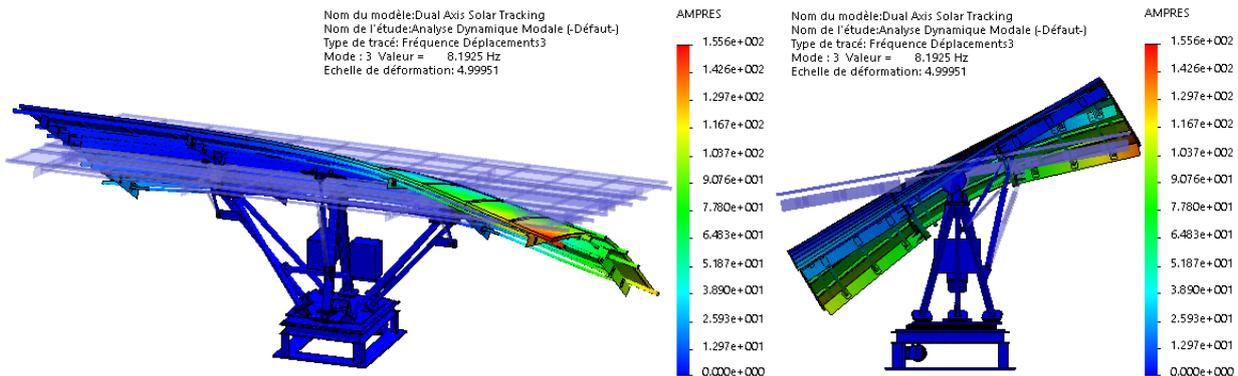
Figure 6.3 : Prédiction des quatre premiers modes de vibration du suiveur – Position  $\beta = 20^\circ$ .



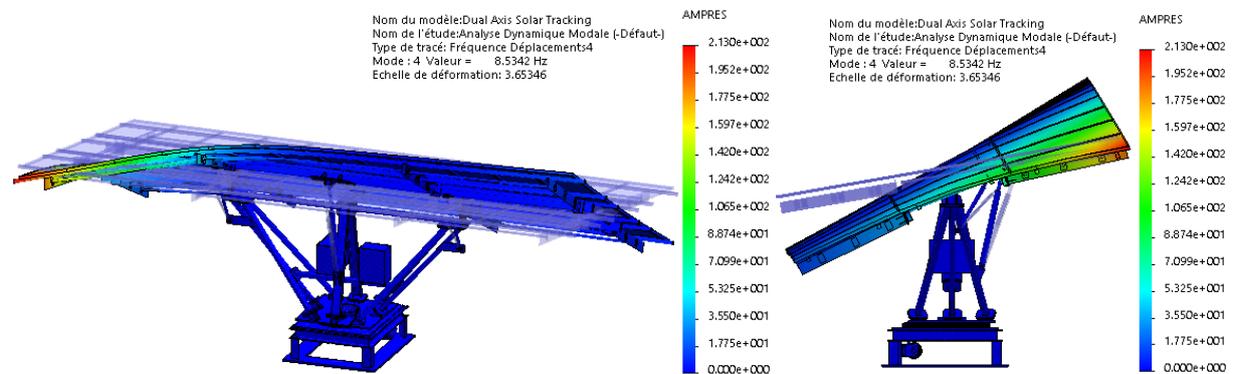
(a) 1<sup>er</sup> mode de vibration (7.752 Hz)



(b) 2<sup>ème</sup> mode de vibration (8.028 Hz)

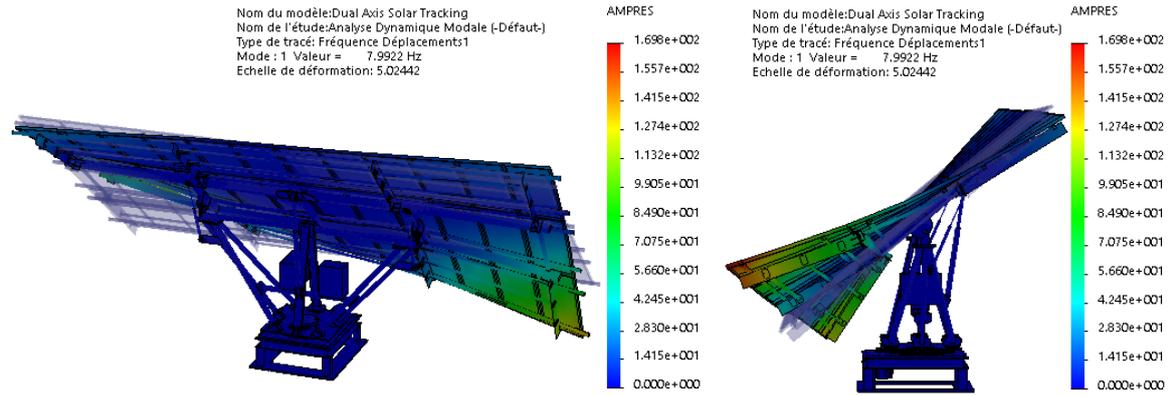


(c) 3<sup>ème</sup> mode de vibration (8.192 Hz)

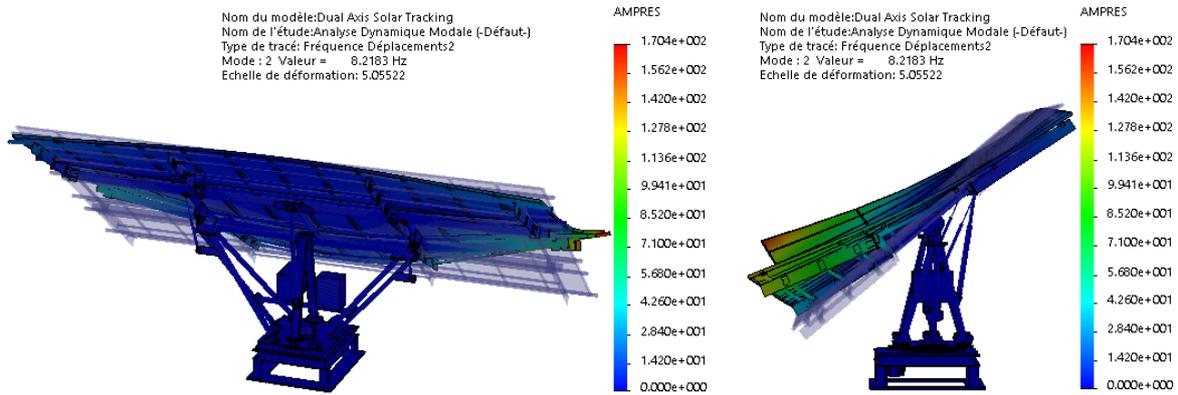


(d) 4<sup>ème</sup> mode de vibration (8.534 Hz)

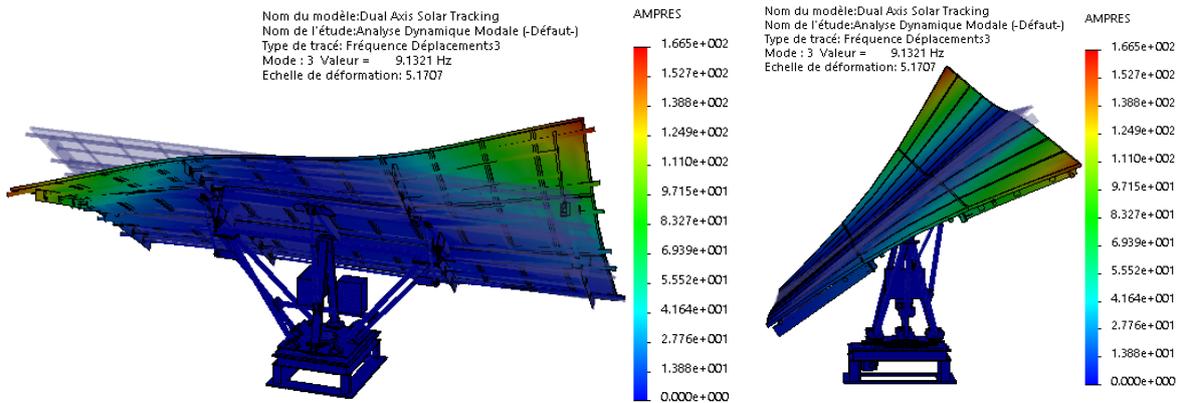
Figure 6.4 : Prédiction des quatre premiers modes de vibration du suiveur – Position  $\beta = 30^\circ$ .



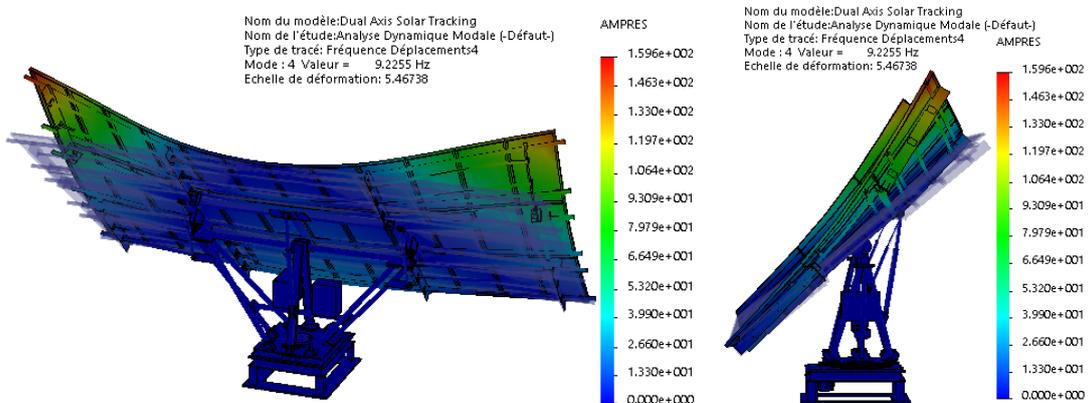
(a) 1<sup>er</sup> mode de vibration (7.992 Hz)



(b) 2<sup>ème</sup> mode de vibration (8.218 Hz)

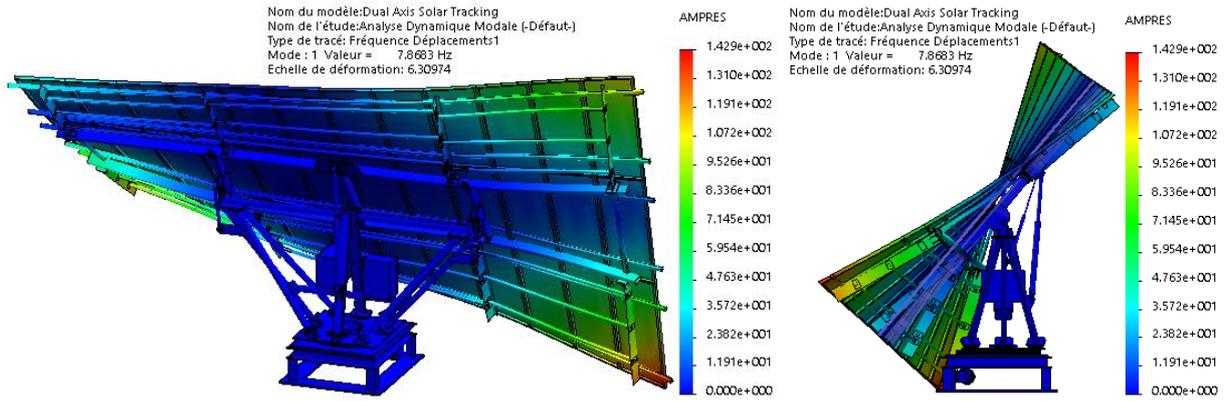


(c) 3<sup>ème</sup> mode de vibration (9.132 Hz)

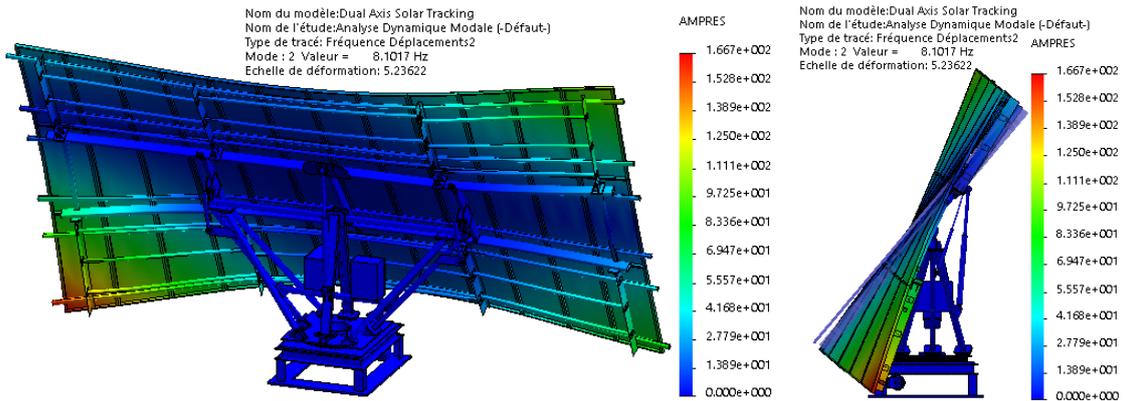


(d) 4<sup>ème</sup> mode de vibration (9.225 Hz)

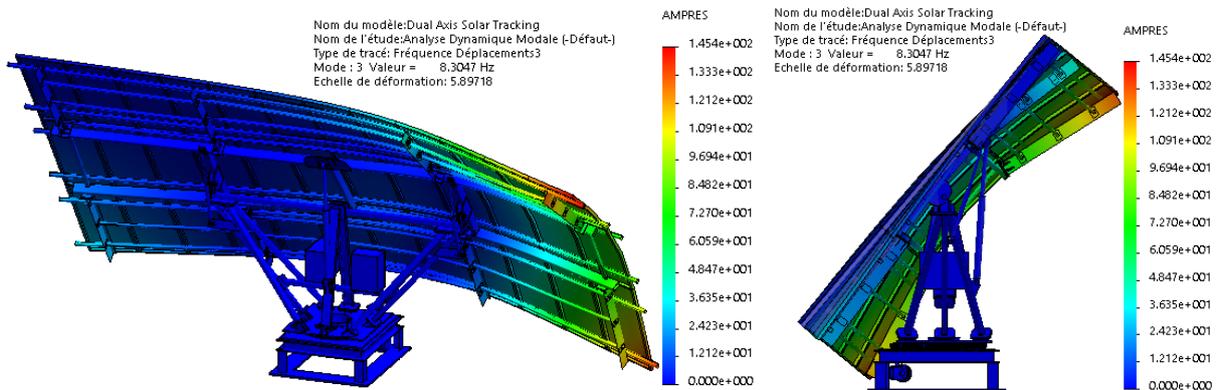
Figure 6.5 : Prédiction des quatre premiers modes de vibration du suiveur – Position  $\beta = 40^\circ$ .



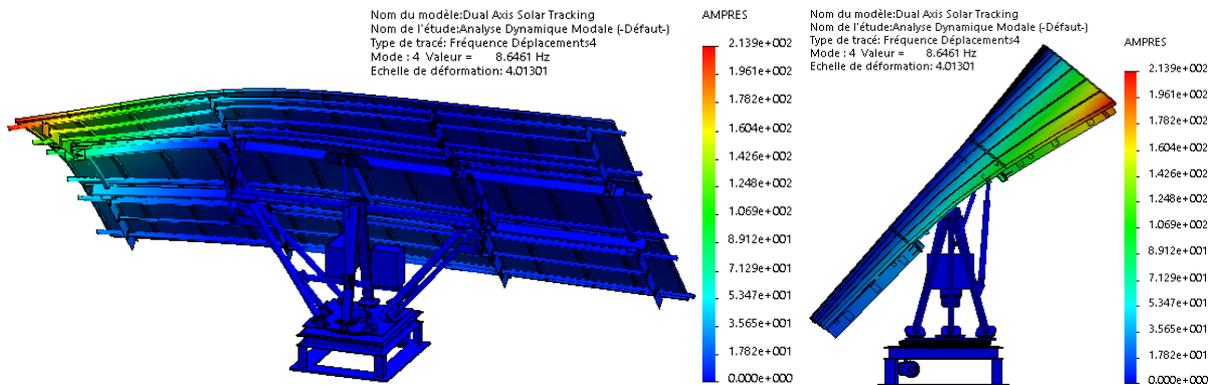
(a) 1<sup>er</sup> mode de vibration (7.868 Hz)



(b) 2<sup>ème</sup> mode de vibration (8.101 Hz)



(c) 3<sup>ème</sup> mode de vibration (8.304 Hz)



(d) 4<sup>ème</sup> mode de vibration (8.646 Hz)

Figure 6.6 : Prédiction des quatre premiers modes de vibration du suiveur – Position  $\beta = 50^\circ$ .

### 6.3.2 Fréquences propres

Les fréquences propres du système de suiveur Tableau (6.1) sont identiques pour chaque mode de vibration. Cela est en bon accord avec la théorie. Les différentes postures du suiveur en élévation n'ont aucune influence sur les fréquences propres à cause de la répartition symétrique de l'inertie.

Les vingt fréquences propres du suiveur augmentent d'une manière logarithmique en fonction des modes de vibration (Figure 6.7) correspondantes pour les différentes positions.

**Tableau 6.1** : Les vingt premières fréquences propres des 6 positions du suiveur.

Numéro de Mode	Fréquences (Hz)					
	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 40^\circ$	$\beta = 50^\circ$
1	7.9542	7.7841	7.8890	7.7524	7.9922	7.8683
2	8.1743	8.0333	8.0927	8.0283	8.2183	8.1017
3	9.0885	8.2006	8.6966	8.1925	9.1321	8.3047
4	9.1929	8.597	8.7393	8.5342	9.2255	8.6461
5	11.038	10.618	10.677	10.585	11.081	10.777
6	11.779	11.732	11.819	11.717	11.868	11.88
7	14.458	12.748	13.615	12.653	14.533	12.728
8	16.801	16.764	16.804	16.771	16.964	17.134
9	17.857	17.131	17.518	17.027	17.941	17.163
10	21.100	20.483	20.82	20.373	21.154	20.561
11	21.212	20.941	21.026	20.883	21.348	21.101
12	21.464	21.228	21.326	21.17	21.53	21.568
13	21.519	21.467	21.595	21.367	21.732	21.784
14	21.990	21.848	21.941	21.788	22.024	21.95
15	24.028	24.046	24.154	23.844	24.056	24.114
16	24.115	24.089	24.192	23.909	24.148	24.148
17	24.440	24.173	24.246	24.096	24.547	24.411
18	27.231	27.153	26.819	26.989	27.082	26.952
19	27.355	27.203	27.039	27.038	27.385	27.054
20	27.767	27.721	27.616	27.525	27.634	27.598

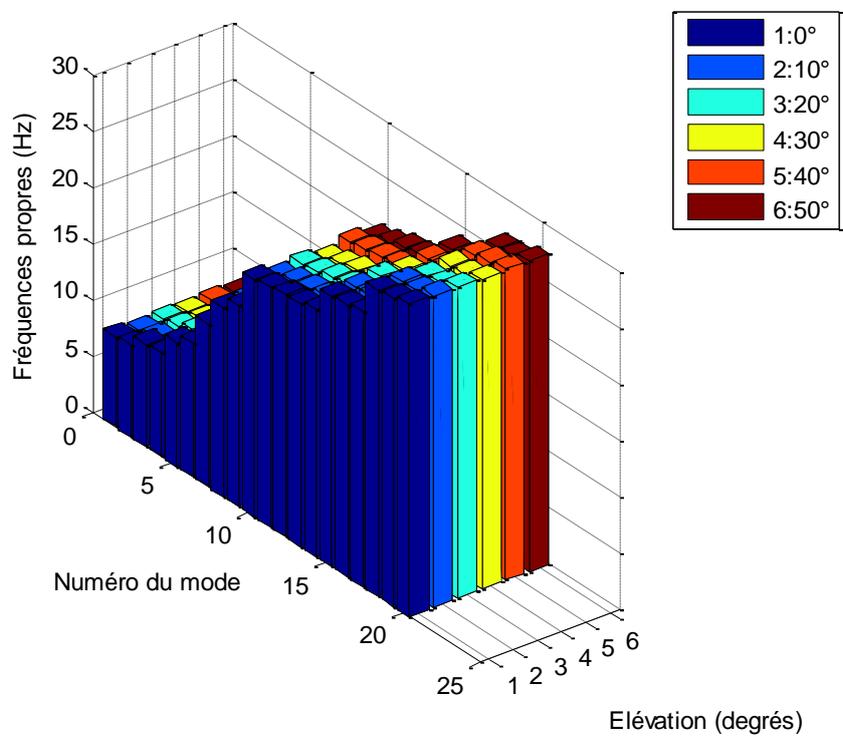
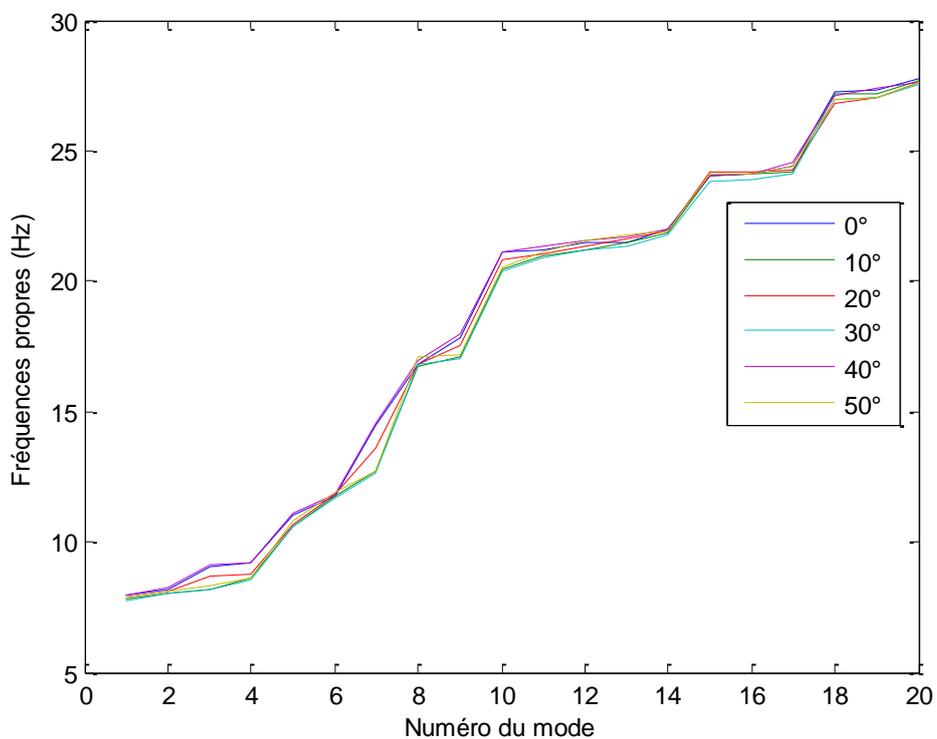


Figure 6.7 : Fréquences propres du suiveur.

### 6.3.3 Indices de performance dynamique modale du suiveur

Les indices de performance de la simulation de l'analyse dynamique modale de la structure du NSSS2 sont résumés dans le Tableau (6.2).

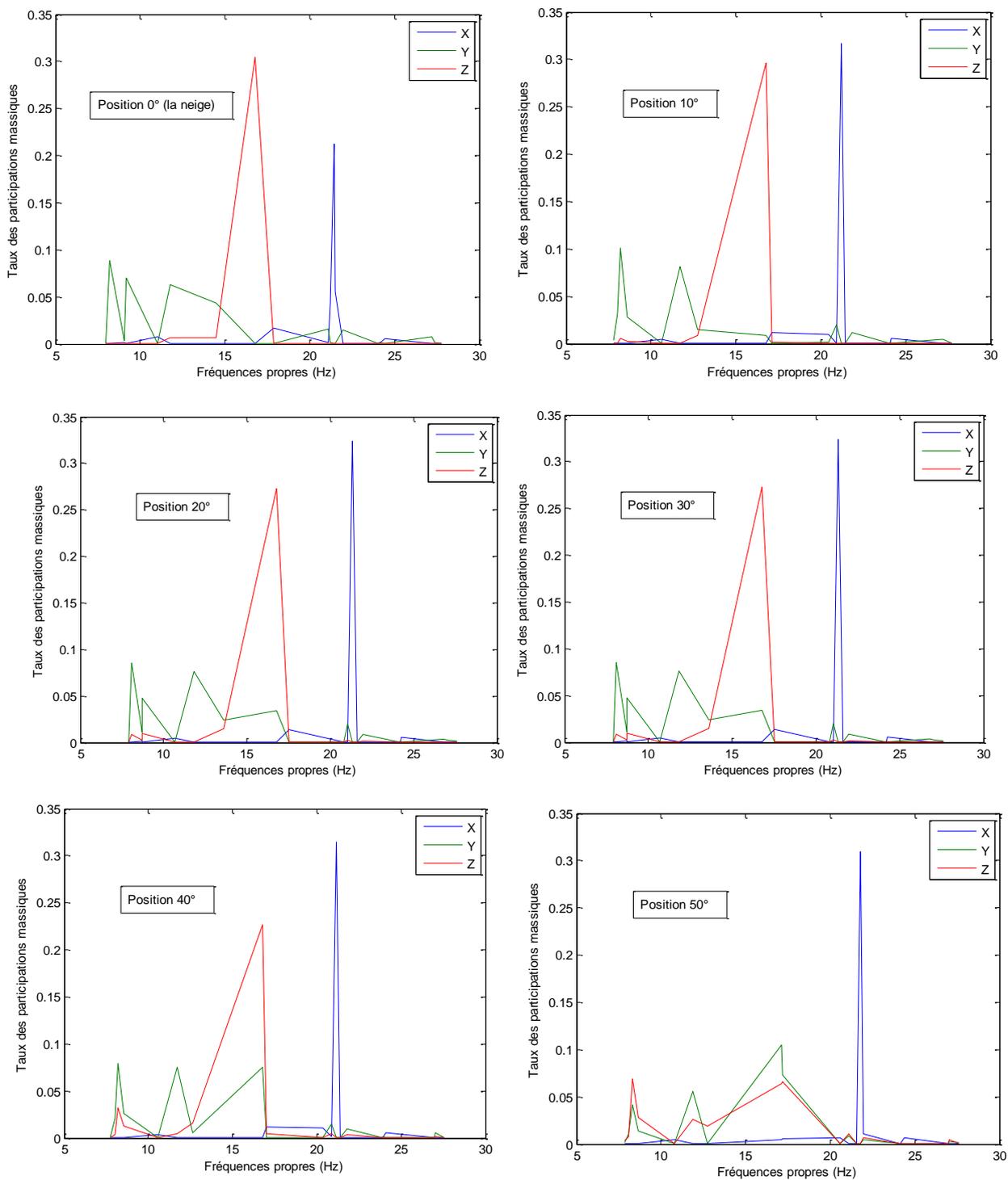
Les valeurs du facteur d'amortissement modal du NSSS2 sont très proche des valeurs généralement admises dans les règles de conception (1~10%).

Les taux des participations massiques des modes propres sont faibles, inférieures à 10%. Ainsi les modes de vibration n'ont pas une grande influence sur l'état de santé dynamique de la structure du suiveur et cela pour les différentes élévations. En particulier le mode 8 présente un TPM élevé dépassant les 30%. Cela peut induire une source de perturbation ce qui nécessite une régulation adéquate. Les participations massiques du suiveur pour les 6 positions dans les trois directions principaux X, Y et Z sont illustrées dans la Figure (6.8) et leurs valeurs sont présentées dans l'**Annexe 6-1**.

Les facteurs de qualité 5,1938 ~ 5.5275 pour les dix premiers modes de vibration montrent que ses performances dynamiques sont dans les normes et par conséquent la stabilité et la fiabilité de la structure sont confirmées.

**Tableau 6.2 : Indices de performance de la structure du suiveur.**

N° mode	Position $\beta = 0^\circ$				Position $\beta = 10^\circ$			
	$\xi_r[-]$	TPM [%]	$Q_r[-]$	$ A_r _{\max}/ A_1 _{\max}$ [%]	$\xi_r[-]$	TPM [%]	$Q_r[-]$	$ A_r _{\max}/ A_1 _{\max}$ [%]
1	0.0962	0.0165	5.1989	100	0.0963	0.3174	5.1946	100
2	0.0961	8.8465	5.0244	94.6873	0.0961	3.1609	5.2008	93.8921
3	0.0957	0.4287	5.2272	76.5964	0.0961	10.1284	5.2050	90.1002
4	0.0956	7.0336	5.2298	74.8666	0.0959	2.8485	5.2149	81.9828
5	0.0948	0.7941	5.2759	51.9293	0.0950	0.4186	5.2655	53.7442
6	0.0944	6.3640	5.2945	45.6012	0.0945	8.1575	5.2933	44.0223
7	0.0933	4.4011	5.3614	30.2675	0.0940	1.7032	5.3187	37.2849
8	0.0923	30.395	5.4200	22.4142	0.0923	29.6297	5.4191	21.5606
9	0.0918	1.6808	5.4464	19.8416	0.0921	1.1829	5.4283	20.6467
10	0.0905	1.5695	5.5275	14.2111	0.0907	1.0282	5.5121	14.4421
N° mode	Position $\beta = 20^\circ$				Position $\beta = 30^\circ$			
	$\xi_r[-]$	TPM [%]	$Q_r[-]$	$ A_r _{\max}/ A_1 _{\max}$ [%]	$\xi_r[-]$	TPM [%]	$Q_r[-]$	$ A_r _{\max}/ A_1 _{\max}$ [%]
1	0.0962	0.0100	5.1972	100	0.0963	0.0854	5.1938	100
2	0.0961	8.5585	5.2023	97.4829	0.0961	2.1619	5.2007	96.5634
3	0.0958	1.1270	5.2174	90.7136	0.0961	8.5219	5.2048	94.6280
4	0.0958	4.8388	5.2185	90.2704	0.0959	2.9668	5.2134	90.8392
5	0.0949	0.4200	5.2669	73.8878	0.0950	0.4100	5.2646	73.2395
6	0.0944	7.6300	5.2955	44.5536	0.0945	7.4948	5.2929	66.1637
7	0.0936	2.8079	5.3404	66.7485	0.0940	1.7019	5.3163	61.2693
8	0.0922	27.479	5.4201	57.9434	0.0923	23.9195	5.4193	46.2250
9	0.0919	1.3700	5.4379	46.9472	0.0922	1.2442	5.4257	45.5300
10	0.0906	0.0200	5.5205	45.0337	0.0908	1.0516	5.5093	38.0523
N° mode	Position $\beta = 40^\circ$				Position $\beta = 50^\circ$			
	$\xi_r[-]$	TPM [%]	$Q_r[-]$	$ A_r _{\max}/ A_1 _{\max}$ [%]	$\xi_r[-]$	TPM [%]	$Q_r[-]$	$ A_r _{\max}/ A_1 _{\max}$ [%]
1	0.0963	0.0808	5.1938	100	0.0962	0.3956	5.1967	100
2	0.0961	2.1649	5.2007	93.2449	0.0961	1.3154	5.2025	94.3212
3	0.0961	8.5263	5.2048	89.5446	0.0960	8.0588	5.2076	89.7664
4	0.0959	2.9664	5.2134	82.5176	0.0959	3.1805	5.2162	82.8173
5	0.0950	0.4051	5.2646	53.6402	0.0949	0.4313	5.2694	53.3048
6	0.0945	7.4943	5.2929	43.7763	0.0944	6.1904	5.2970	43.8661
7	0.0940	1.7064	5.3163	37.5392	0.0940	1.8750	5.3182	38.2157
8	0.0923	23.923	5.4193	21.3675	0.0921	12.2621	5.4284	21.0884
9	0.0922	1.2473	5.4257	20.7298	0.0921	9.8803	5.4291	21.0172
10	0.0908	1.0557	5.5093	14.4798	0.0907	0.6747	5.5140	14.6445



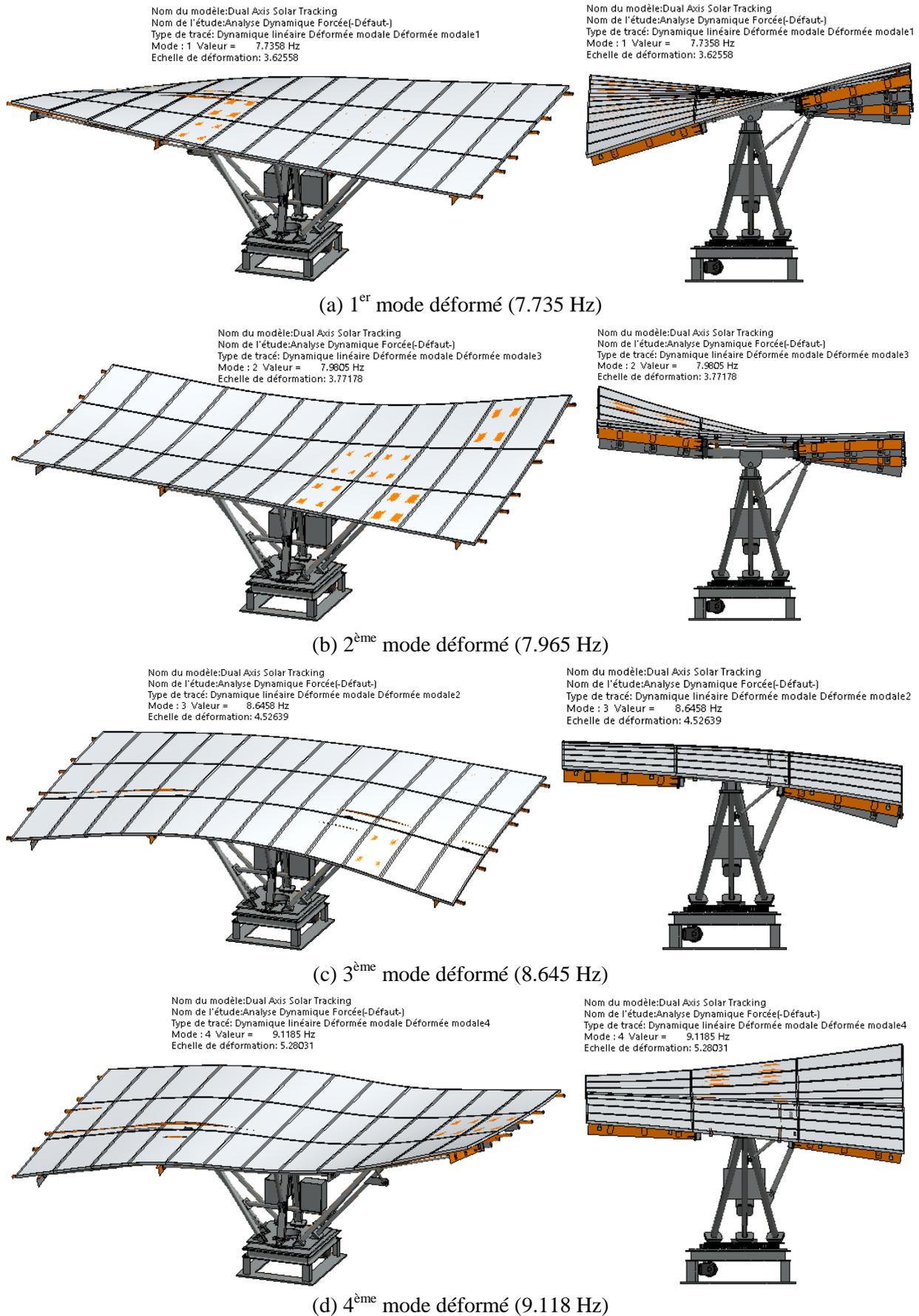
**Figure 6.8 :** Les taux des participations massiques dans les trois directions (X, Y et Z) pour différentes positions du suiveur.

## **6.4 Analyse dynamique forcée du suiveur**

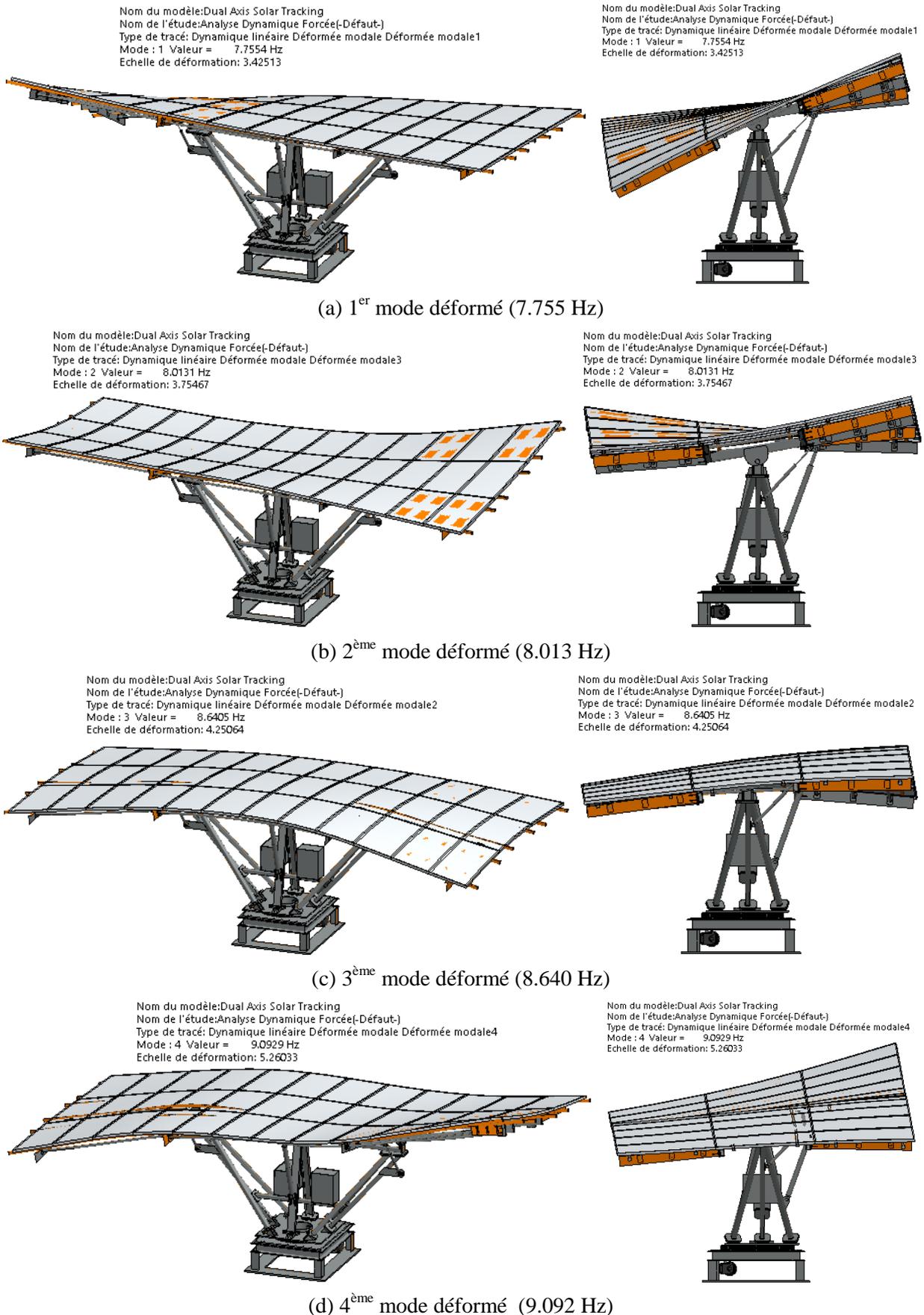
Les résultats de la simulation dynamique forcée (harmonique) du suiveur sont présentés dans les Figures (6.9 à 6.16) et les Tableaux (6.3 et 6.4).

### **6.4.1 Modes et indices de performance dynamique forcée du suiveur**

Les modes de vibration dynamique du système de suiveur présentent pratiquement les mêmes caractéristiques vibratoires que les modes naturels. Ainsi, l'analyse et les recommandations effectuées sont similaires pour les deux conditions. L'effet dynamique harmonique du système de suiveur est très proche de l'effet modal.



**Figure 6.9 :** Prédiction des quatre premiers modes déformés du suiveur dues à la neige –  $\beta = 0^\circ$ .



**Figure 6.10 :** Prédiction des quatre premiers modes déformés du suiveur dues au vent –  $\beta = 10^\circ$ .

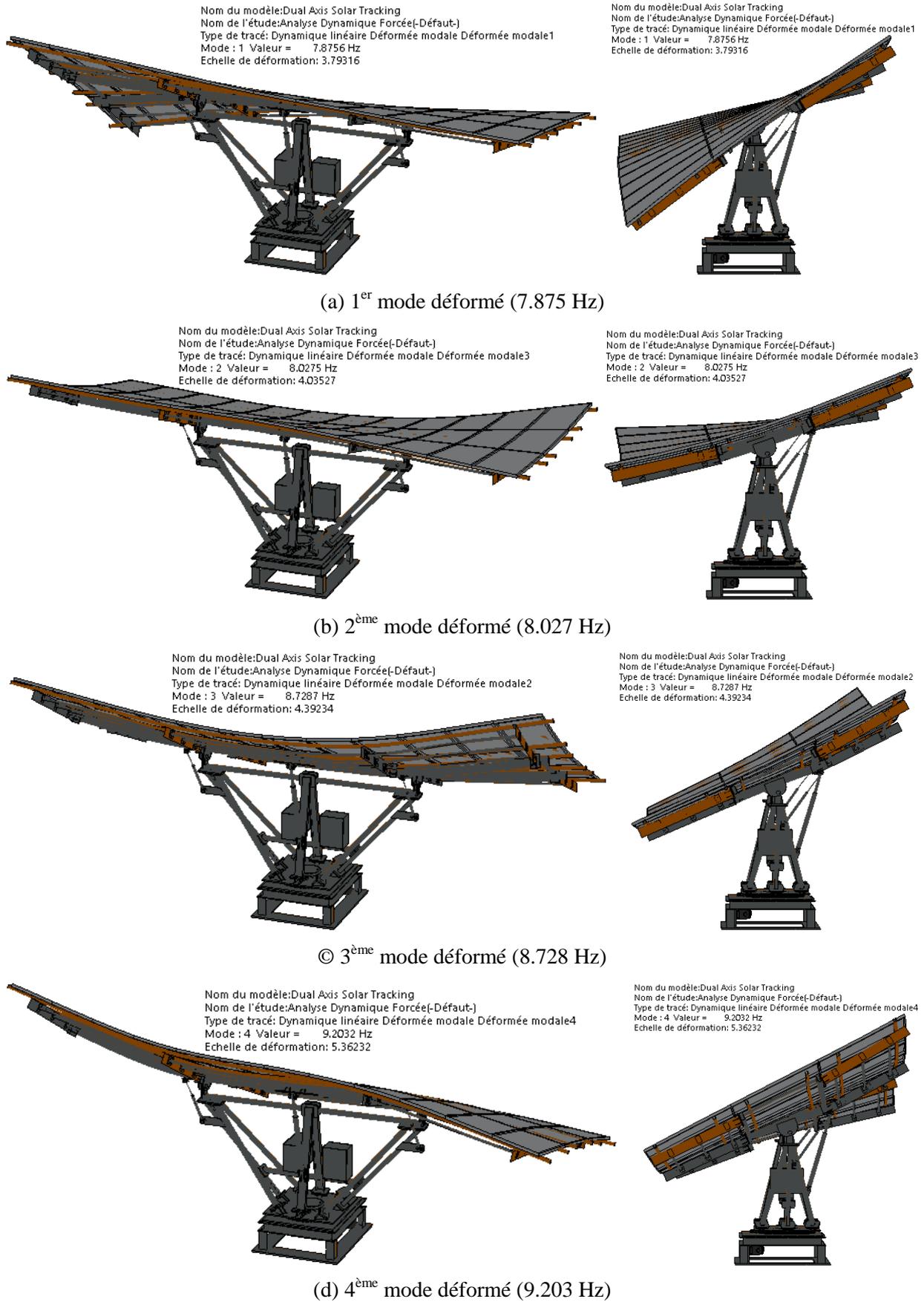


Figure 6.11 : Prédiction des quatre premiers modes déformés du suiveur dus au vent  $-\beta = 20^\circ$ .

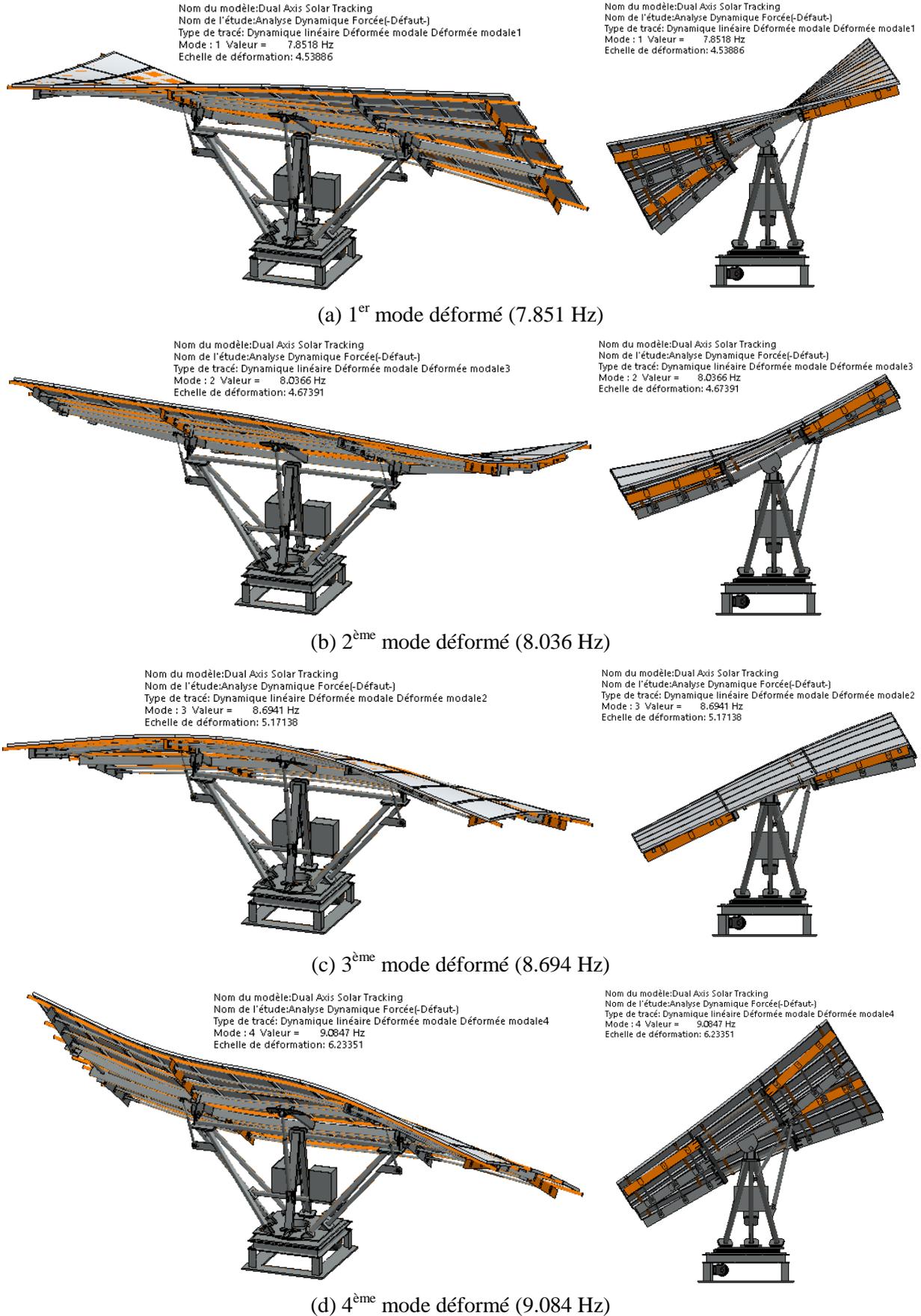
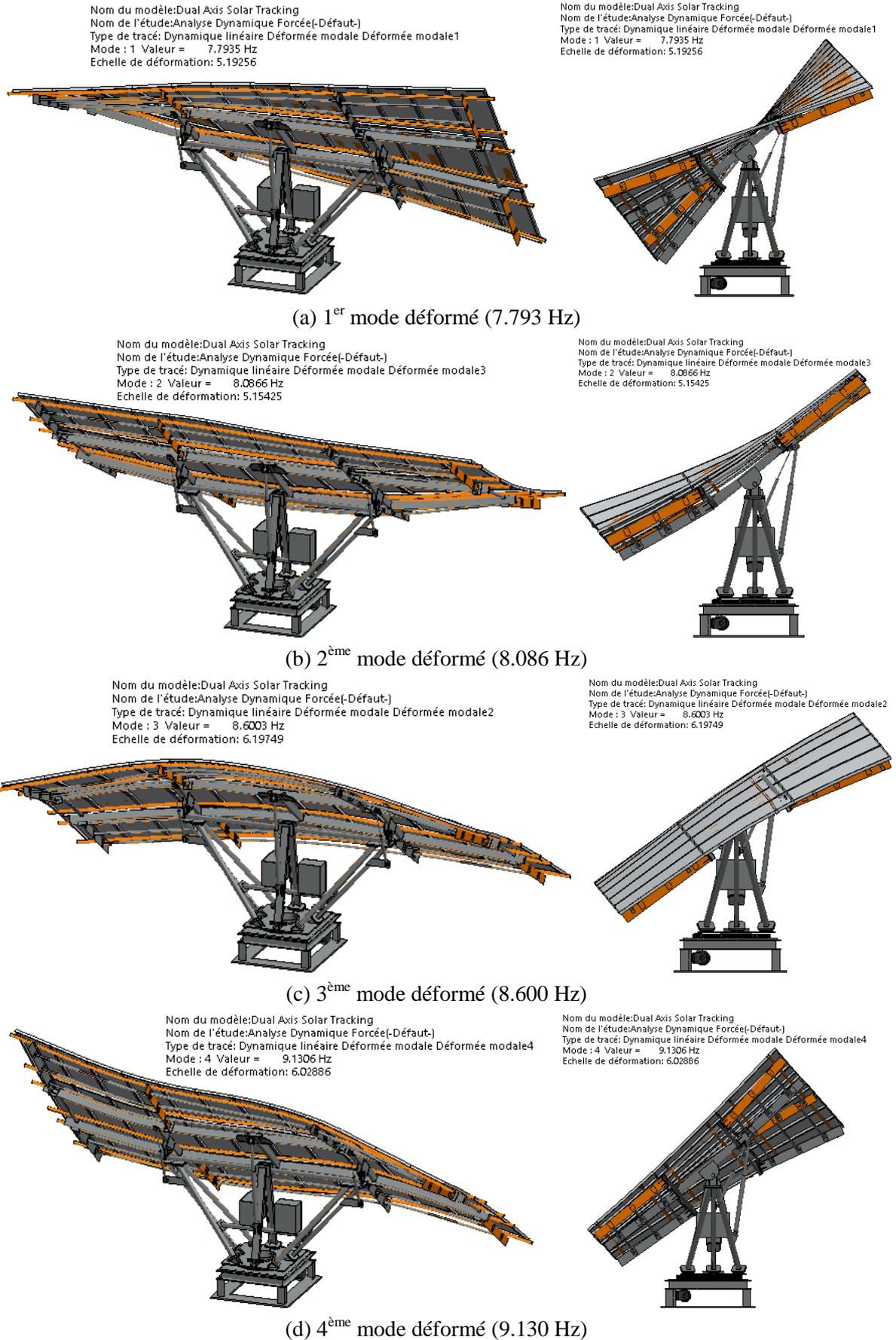
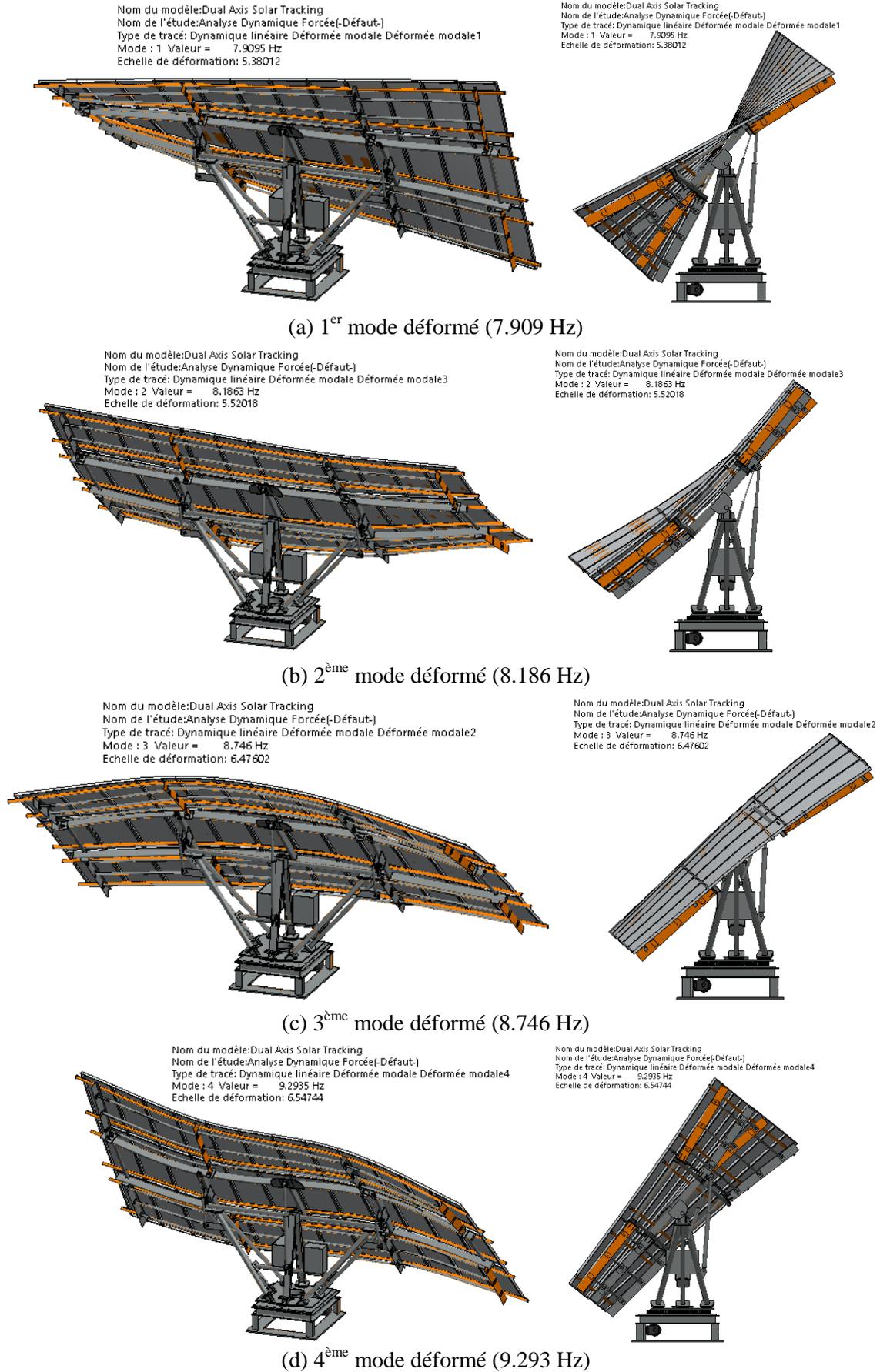


Figure 6.12 : Prédiction des quatre premiers modes déformés du suiveur dus au vent  $\beta = 30^\circ$ .



**Figure 6.13 : Prédiction des quatre premiers modes déformés du suiveur dus au vent –  $\beta = 40^\circ$ .**



**Figure 6.14 :** Prédiction des quatre premiers modes déformés du suiveur dus au vent –  $\beta = 50^\circ$ .

**Tableau 6.3** : Les vingt premières fréquences de résonances des 6 positions du suiveur.

Numéro de Mode	Fréquences (Hz)					
	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 40^\circ$	$\beta = 50^\circ$
<b>1</b>	7.7358	7.7554	7.8756	7.8518	7.7935	7.9095
<b>2</b>	7.9805	8.0131	8.0275	8.0366	8.0866	8.1863
<b>3</b>	8.6458	8.6405	8.7287	8.6941	8.6003	8.746
<b>4</b>	9.1185	9.0929	9.2032	9.0847	9.1306	9.2935
<b>5</b>	10.914	11.009	10.911	10.839	11.096	11.107
<b>6</b>	11.758	11.716	11.948	11.938	11.996	12.259
<b>7</b>	13.546	13.483	13.829	13.784	13.881	14.777
<b>8</b>	16.949	17.123	17.099	17.125	17.052	17.17
<b>9</b>	20.593	21.056	20.753	20.689	20.909	21.129
<b>10</b>	22.101	22.144	22.474	21.988	22.016	22.634
<b>11</b>	24.148	22.923	23.179	25.071	24.848	25.403
<b>12</b>	24.44	23.534	24.268	25.791	25.7	26.225
<b>13</b>	25.197	24.905	25.955	26.144	26.057	26.679
<b>14</b>	26.379	26.24	26.903	27.844	28.649	28.79
<b>15</b>	28.095	26.366	27.669	28.455	29.282	32.296
<b>16</b>	30.563	28.296	28.108	30.076	30.437	32.428
<b>17</b>	30.762	30.381	30.65	31.493	31.532	32.829
<b>18</b>	34.045	31.58	32.641	33.05	32.35	35.104
<b>19</b>	34.322	32.42	33.255	33.695	35.496	36.548
<b>20</b>	35.922	33.286	33.305	35.471	36.394	38.15

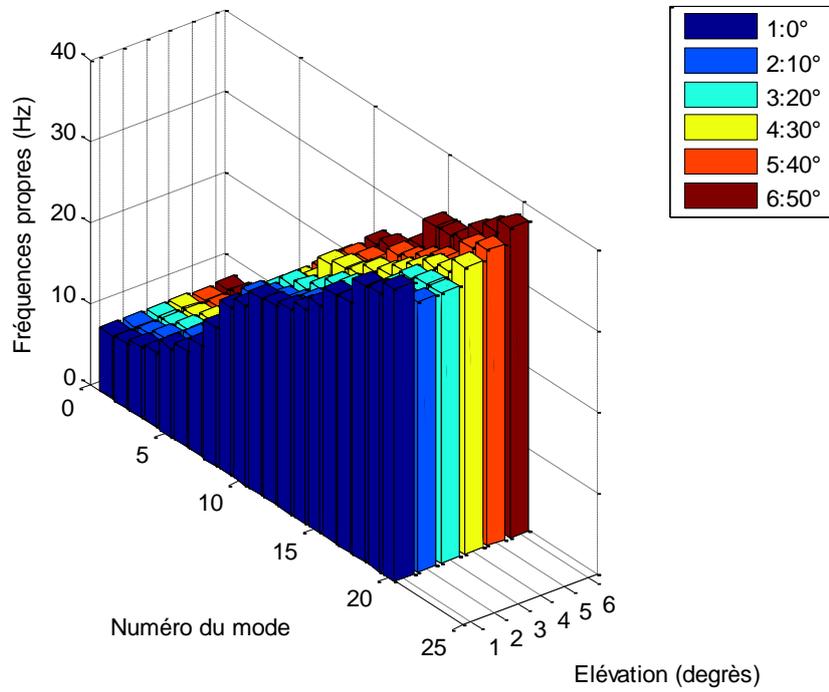
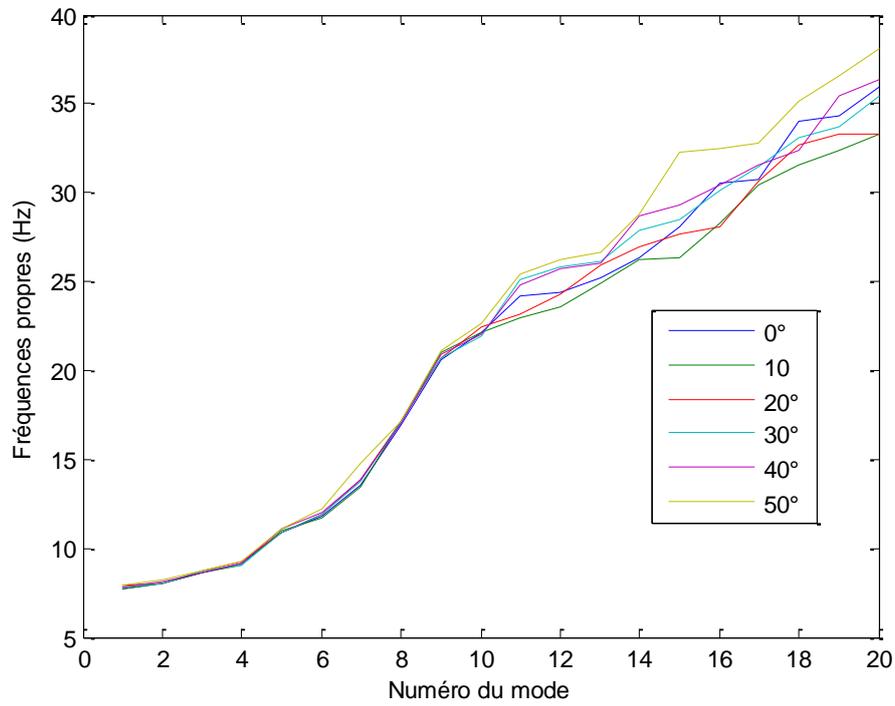
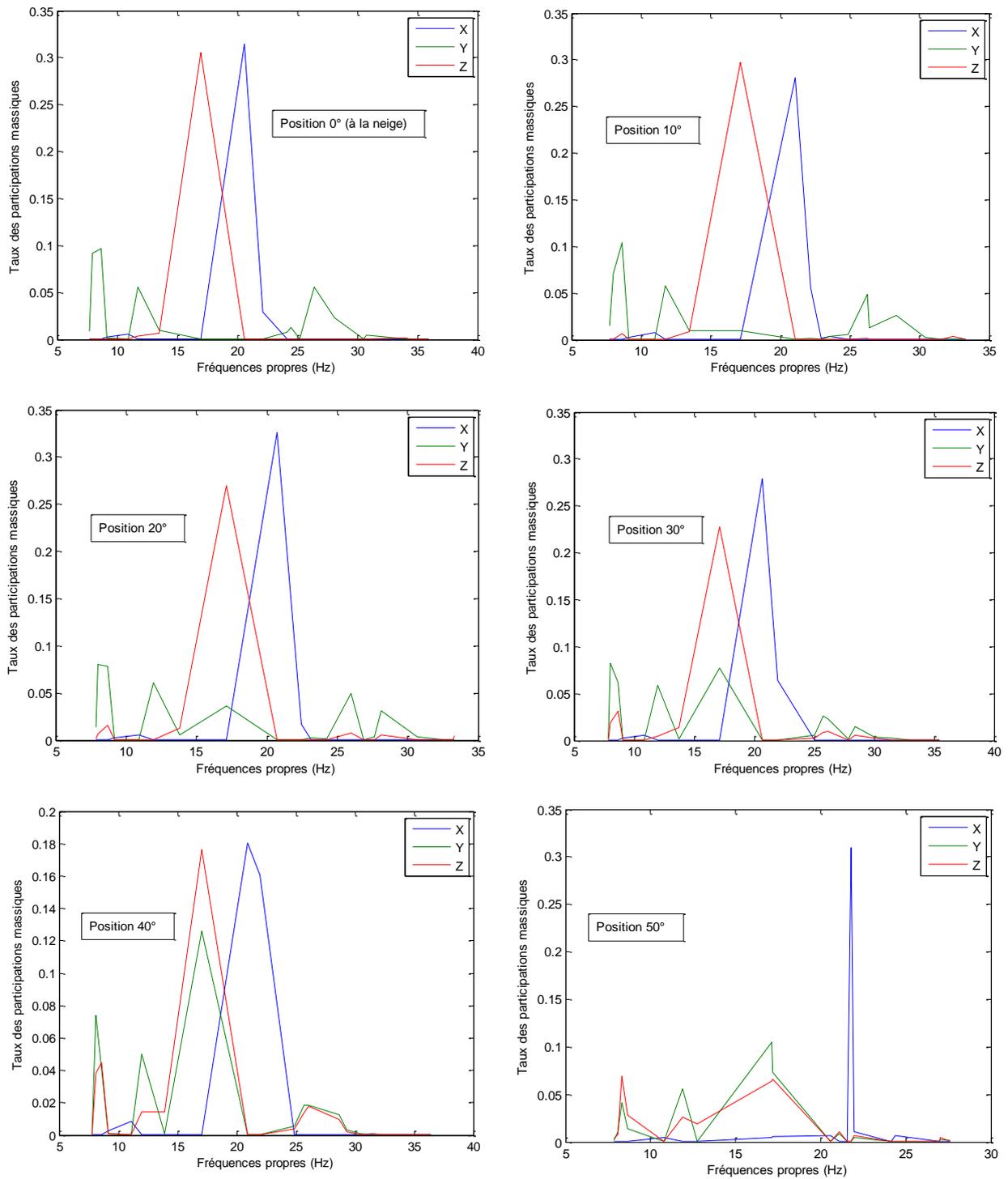


Figure 6.15 : Fréquences de résonances du suiveur.

**Tableau 6.4 : Indices de performance de la structure du suiveur.**

N° mode	Position $\beta = 0^\circ$				Position $\beta = 10^\circ$			
	$\xi_r[-]$	TPM [%]	$Q_r[-]$	$ A_r _{\max}/ A_1 _{\max} [\%]$	$\xi_r[-]$	TPM [%]	$Q_r[-]$	$ A_r _{\max}/ A_1 _{\max} [\%]$
1	0.0963	0.8619	5.1934	100	0.0963	1.5273	5.1939	100
2	0.0962	9.1894	5.1995	93.9616	0.0961	7.1437	5.2003	93.6715
3	0.0959	9.6452	5.2161	80.0571	0.0959	10.3752	5.2160	80.5621
4	0.0956	0.2851	5.2280	71.9720	0.0957	0.2344	5.2273	72.7451
5	0.0948	0.5150	5.2729	50.2392	0.0948	0.7713	5.2752	49.6264
6	0.0944	5.5887	5.2939	43.2856	0.0945	5.7412	5.2929	43.8177
7	0.0937	1.2102	5.3387	32.6128	0.0937	1.3078	5.3371	33.0853
8	0.0922	30.592	5.4237	20.8316	0.0921	29.7832	5.4281	20.5139
9	0.0907	31.497	5.5148	14.1114	0.0905	28.0940	5.5264	13.5662
10	0.0900	2.9005	5.5525	12.2514	0.0900	5.5286	5.5536	12.2658
N° mode	Position $\beta = 20^\circ$				Position $\beta = 30^\circ$			
	$\xi_r[-]$	TPM [%]	$Q_r[-]$	$ A_r _{\max}/ A_1 _{\max} [\%]$	$\xi_r[-]$	TPM [%]	$Q_r[-]$	$ A_r _{\max}/ A_1 _{\max} [\%]$
1	0.0962	1.3874	5.1969	100	0.0962	0.2106	5.1963	100
2	0.0961	8.0455	5.2007	96.2513	0.0961	8.4304	5.2009	95.4539
3	0.0958	7.9868	5.2182	81.4082	0.0958	6.9485	5.2174	81.5622
4	0.0956	0.2591	5.2301	73.2301	0.0957	0.2871	5.2271	74.6994
5	0.0948	0.5324	5.2728	52.1001	0.0949	0.5479	5.2710	52.4759
6	0.0944	6.0689	5.2987	43.4487	0.0944	5.9013	5.2984	43.2589
7	0.0935	1.3887	5.3457	32.4329	0.0936	1.4363	5.3446	32.4480
8	0.0921	27.251	5.4275	21.2142	0.0921	24.0879	5.4281	21.0222
9	0.0906	32.629	5.5188	14.4014	0.0906	27.8560	5.5172	14.4032
10	0.0899	1.7070	5.5618	12.2802	0.0901	6.4030	5.5497	12.7517
N° mode	Position $\beta = 40^\circ$				Position $\beta = 50^\circ$			
	$\xi_r[-]$	TPM [%]	$Q_r[-]$	$ A_r _{\max}/ A_1 _{\max} [\%]$	$\xi_r[-]$	TPM [%]	$Q_r[-]$	$ A_r _{\max}/ A_1 _{\max} [\%]$
1	0.0962	0.0979	5.1948	100	0.0962	0.3956	5.1967	100
2	0.0961	8.3052	5.2022	92.8823	0.0961	1.3154	5.2025	94.3212
3	0.0959	6.0440	5.2150	82.1179	0.0960	8.0588	5.2076	89.7664
4	0.0956	0.2834	5.2283	72.8562	0.0959	3.1805	5.2162	82.8173
5	0.0947	0.8220	5.2774	49.3324	0.0949	0.4313	5.2694	53.3048
6	0.0943	5.2245	5.2999	42.2077	0.0944	6.1904	5.2970	43.8661
7	0.0935	1.4149	5.3470	31.5227	0.0940	1.8750	5.3182	38.2157
8	0.0921	21.659	5.4263	20.8888	0.0921	12.2621	5.4284	21.0884
9	0.0905	18.012	5.5227	13.8931	0.0921	9.8803	5.4291	21.0172
10	0.0901	16.023	5.5504	12.5311	0.0907	0.6747	5.5140	14.6445



**Figure 6.16 :** Les taux des participations massiques dans les trois directions (X, Y et Z) pour différentes position du suiveur.

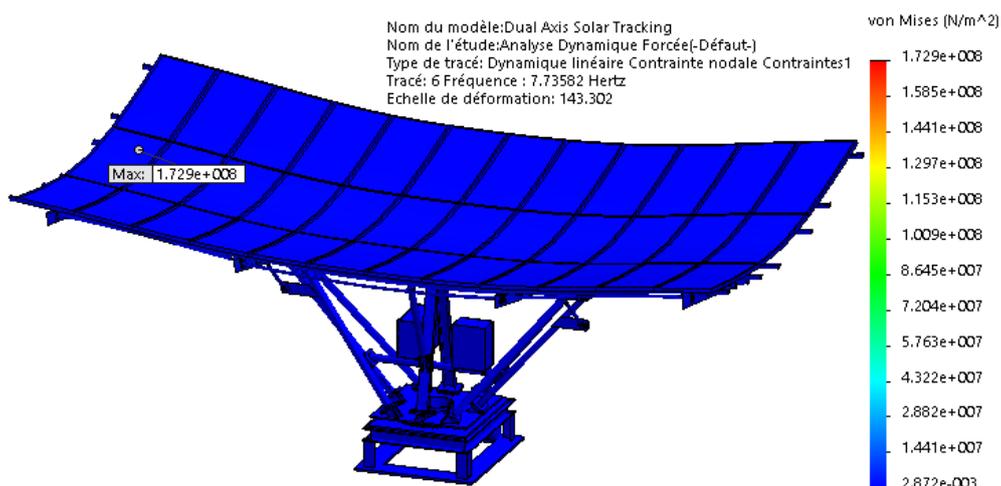
### 6.4.2 Contraintes équivalentes de Von Mises

Les distributions des contraintes équivalentes de Von Mises et leurs valeurs extrêmes de l'analyse dynamique forcée dans le NSSS2 sont présentés dans le Tableau (6.5) et les Figures (6.17 et 6.18). Les contraintes maximales 172.9, 44.05, 55.34, 71.57, 119.9 MPa et 153.20 MPa respectivement, sont distribuées dans le cadre du support de la grille (tube rectangulaire 30x60mm), côté droit pour les positions 10°, 30°, 40° et 50° et côté gauche pour les angles 0° et 20°. Ces valeurs sont inférieures à la limite élastique admissible des matériaux utilisés et assurent des bons coefficients de 1.27 (CS minimal à la neige) de sécurité du suiveur. Ainsi, la structure résiste au couple du motoréducteur et aux pressions de la neige et de vent.

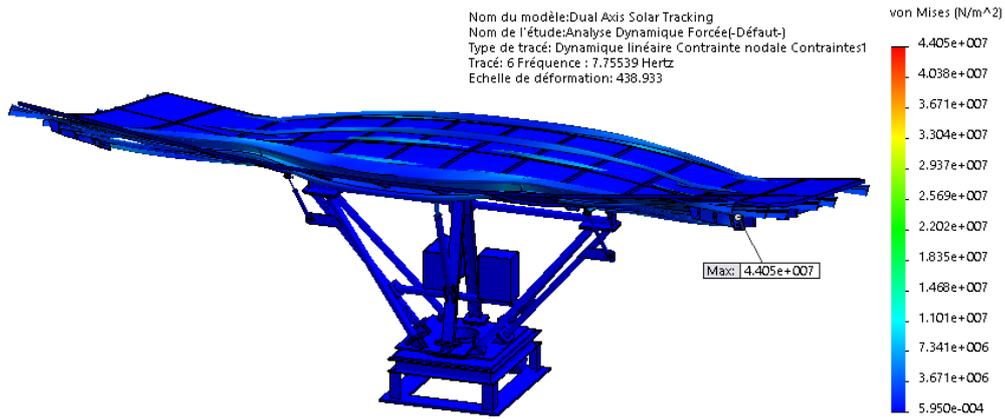
Le Tableau (6.5) montre que le suiveur est plus sollicité au vent lorsqu'il est incliné à une élévation maximale de 50° qu'à la neige lorsqu'il est à la position horizontale. Toutefois, la stabilité mécanique dynamique forcée de la structure résiste au couple du motoréducteur et aux pressions de la neige et de vent dans les deux situations.

**Tableau 6.5 :** Valeurs extrêmes des contraintes équivalentes de Von-Mises du suiveur.

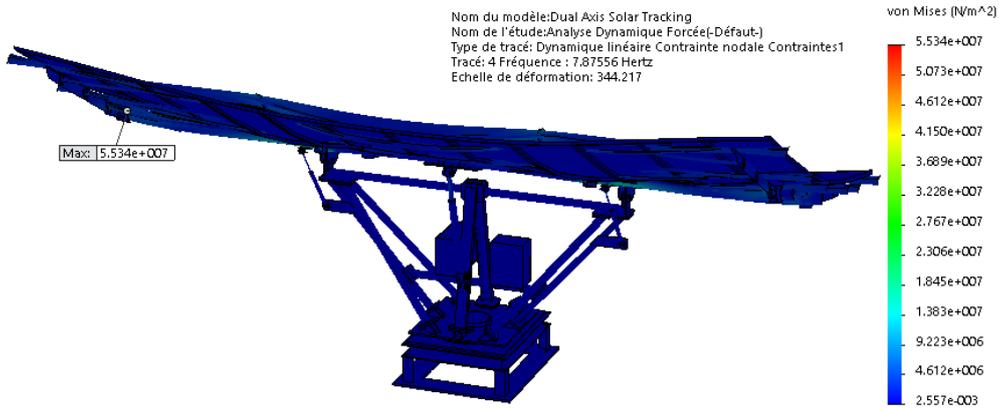
	Positions					
	à la Neige	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 40^\circ$	$\beta = 50^\circ$
Max. Von-Mises [MPa]	172.9	44.05	55.34	71.57	119.9	153.2
Coefficient de Sécurité [---]	1.27	5	3.99	3.08	1.84	1.44



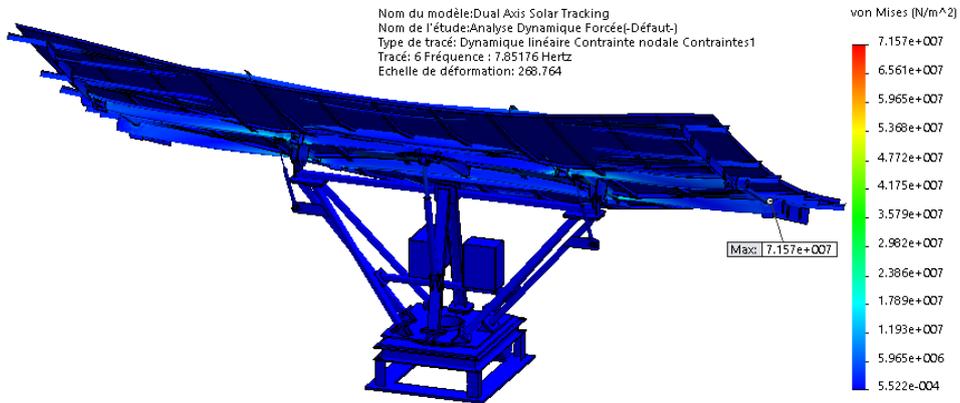
**Figure 6.17 :** Contraintes équivalentes de Von Mises dues à la neige –  $\beta = 0^\circ$ .



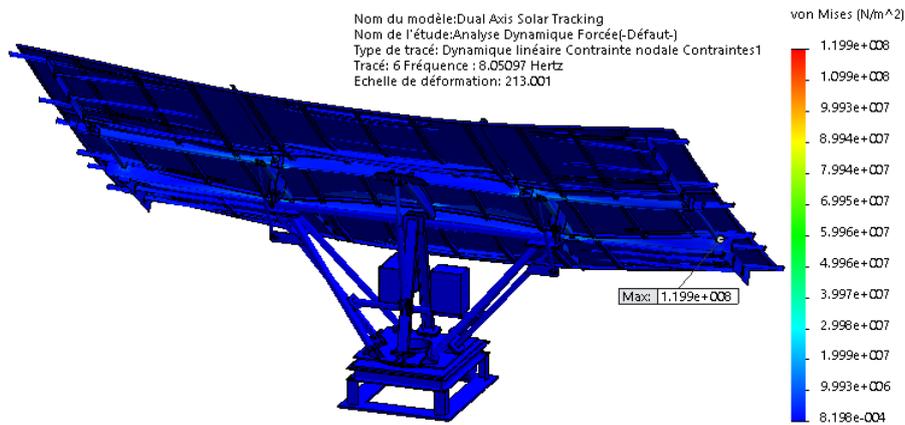
(a) Position  $\beta = 10^\circ$



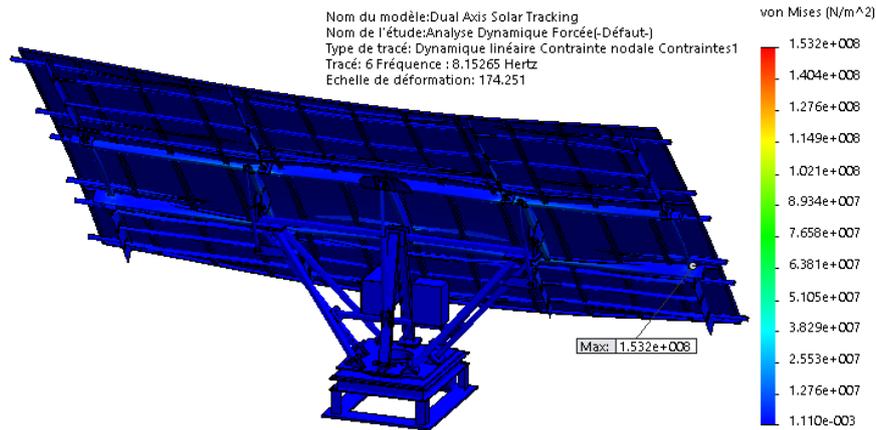
(b) Position  $\beta = 20^\circ$



(c) Position  $\beta = 30^\circ$



(d) Position  $\beta = 40^\circ$



(e) Position  $\beta = 50^\circ$

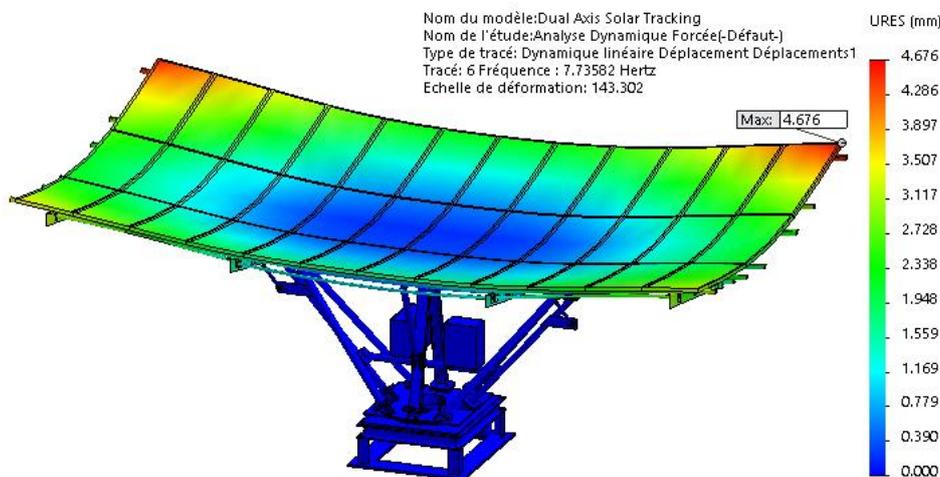
**Figure 6.18 :** Contraintes équivalentes de Von Mises dues au vent, (a) Position  $\beta=10^\circ$ , (b) Position  $\beta=20^\circ$ , (c) Position  $\beta=30^\circ$ , (d) Position  $\beta=40^\circ$  et (e) Position  $\beta=50^\circ$ .

### 6.4.3 Déplacements résultants

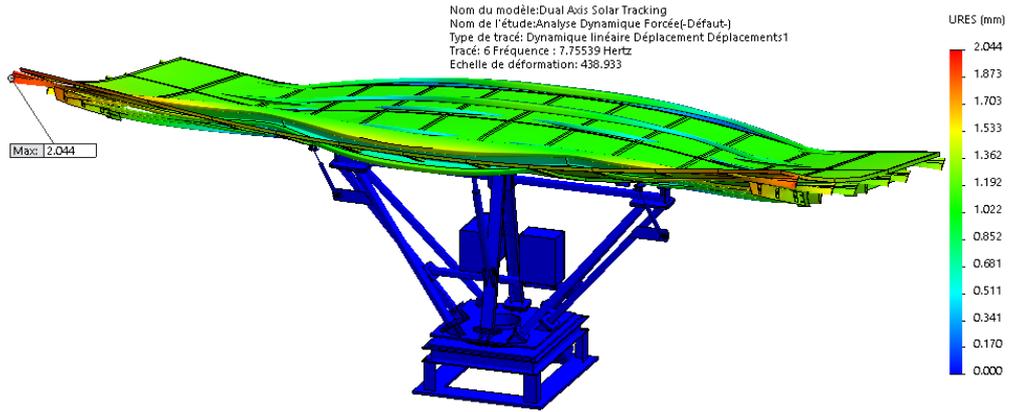
Les Figures (6.19 et 6.20) et le Tableau (6.6) montrent les déplacements critiques de la structure du suiveur. Ils apparaissent aux niveaux des extrémités libres de la structure dans le sens longitudinal et dans un degré moindre au niveau des endroits opposés au point de fixation du vérin mécanique et des amortisseurs de la partie supérieure de la structure du suiveur. Ces déplacements sont faibles 4.676 mm (0.07 %) pour le cas de la neige et sont 2.044, 2.629, 3.308, 3.98 et 4.504 mm respectivement, pour le cas du vent par rapport à la taille de la structure.

**Tableau 6.6 :** Valeurs extrêmes des déplacements résultants du suiveur.

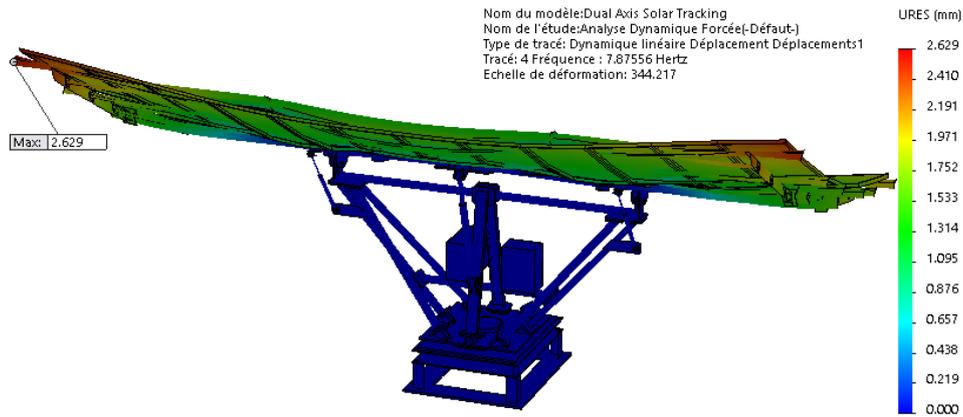
	Positions					
	à la Neige	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 40^\circ$	$\beta = 50^\circ$
<b>Max. Déplacement [mm]</b>	4.676	2.044	2.629	3.308	3.980	4.504



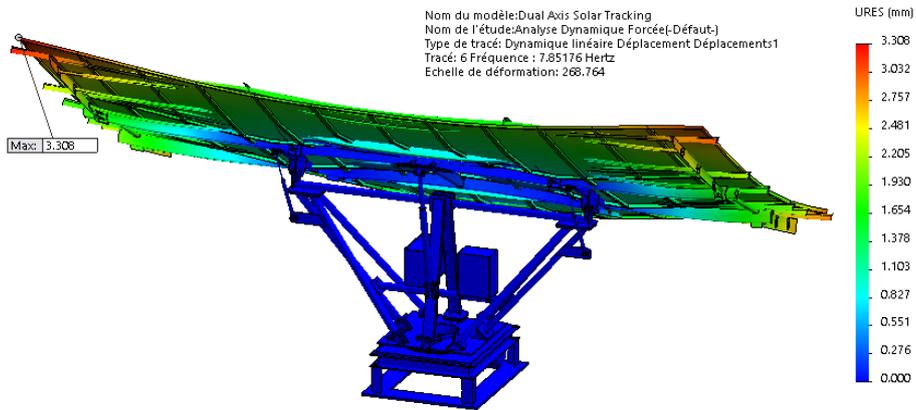
**Figure 6.19 :** Déplacements résultants dus à la neige –  $\beta = 0^\circ$ .



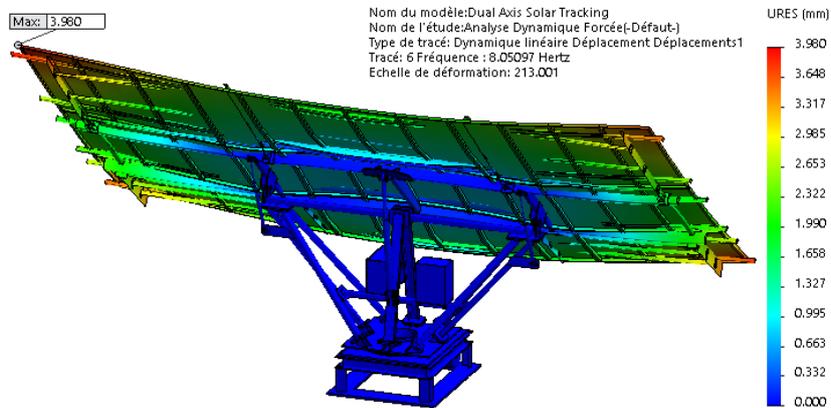
(a) Position  $\beta = 10^\circ$



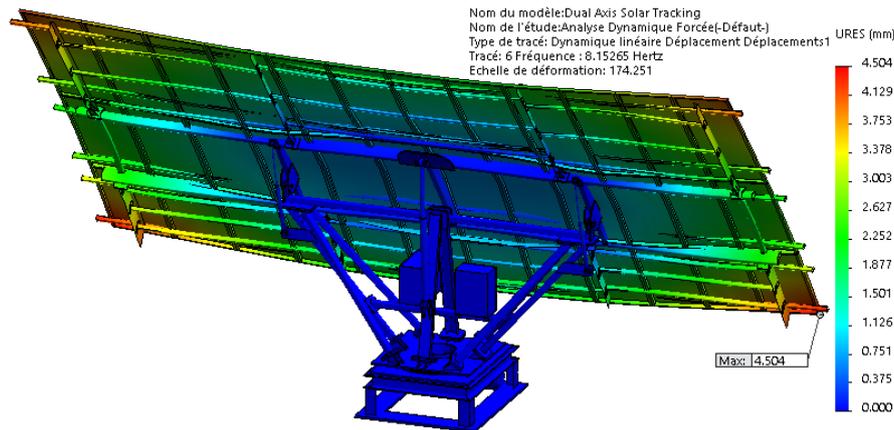
(b) Position  $\beta = 20^\circ$



(c) Position  $\beta = 30^\circ$



(d) Position  $\beta = 40^\circ$

(e) Position  $\beta = 50^\circ$ 

**Figure 6.20 :** Déplacements résultants dues au vent, (a) Position  $\beta=10^\circ$ , (b) Position  $\beta=20^\circ$ , (c) Position  $\beta=30^\circ$ , (d) Position  $\beta=40^\circ$  et (e) Position  $\beta=50^\circ$ .

## 6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, Une analyse dynamique modale et forcée par élément finis du NSSS2 pour les différentes postures du suiveur a été présentée. Cette analyse pour la prédiction des paramètres structuraux optimaux pour le contrôle du système à la résonance et pour protéger le système contre les contraintes et les amplitudes excessives conduisant au mauvais fonctionnement ou à la détérioration du système par fatigue. Les conclusions de cette analyse sont les suivantes :

- La partie supérieure du NSSS2 est la zone la plus sollicitée par les déformations quel que soit la position du système, le support principal en V et la base restent rigides dans tous les modes.
- Les fréquences propres du suiveur identiques pour chaque mode de vibration. Cela est en bon accord avec la théorie. Les différentes postures du suiveur en élévation n'ont aucune influence sur les fréquences propres à cause de la répartition symétrique de l'inertie.
- Les facteurs de qualité du NSSS2 montrent que ses performances dynamiques sont dans les normes et par conséquent la stabilité et la fiabilité de la structure sont confirmées.
- Les modes de vibration dynamique du système de suiveur présentent pratiquement les mêmes caractéristiques vibratoires que les modes naturels. Ainsi, l'analyse et les recommandations effectuées sont similaires pour les deux conditions. L'effet dynamique harmonique du système de suiveur est très proche de l'effet modal.
- Les contraintes de Von Mises sont inférieures à la limite élastique du matériau le plus fragile de la structure avec un facteur de sécurité supérieur à 1 et les déplacements critiques sont faibles 4.676 mm (0.07 %) par rapport à la taille de la structure.

**CONCLUSION GÉNÉRALE  
& PERSPECTIVES**

## Conclusion générale et perspectives

La principale contribution de ce travail de thèse est la proposition d'une conception, d'une modélisation et du traitement de la stabilité et de la fiabilité d'un nouveau prototype de système de suiveur solaire à deux axes du point de vue mécanique et vibratoire. Ce type de système émerge intensivement dans l'industrie moderne afin d'améliorer la quantité de la puissance solaire produite par les systèmes photovoltaïques pour des considérations techniques et économiques.

La première partie de ce travail consiste à une synthèse bibliographique sur les énergies renouvelables et le développement durable du point de vue concepts, systèmes de conversion, modes d'exploitations et perspectives. Ainsi que les principes de base et les technologies des systèmes et des centrales photovoltaïques de puissance à poursuite solaire à un ou à deux axes. Cette partie est clôturée par une présentation détaillée globale sur la procédure d'analyse statique et dynamique linéaire libre et forcée des structures dans le cadre des éléments finis 3D.

En deuxième partie nous avons modélisé géométriquement les structures mécaniques des deux suiveurs le NSSS2 est constitué de 600 pièces et le MS-2 de 800 pièces, leurs assemblages et la vérification de l'interférence des pièces sous le logiciel industriel SOLIDWORKS. Ensuite, nous avons défini les éléments de la simulation numérique statique et dynamique (modale et forcée) : simplification du modèle, attribution des matériaux, définitions des conditions aux limites (chargements et liaisons), maillage de la structure du suiveur et la résolution des systèmes d'équations d'équilibre par le SOLIDWORKS Simulation.

Dans la troisième partie nous avons présenté les résultats de la simulation statique et leurs interprétations à la lumière des critères de performances statique et dynamiques admis par les normes de la réglementation en dynamiques de structure.

A partir des résultats de simulation statique obtenus les conclusions suivantes sont tracées :

- La prédiction des propriétés mécaniques des matériaux en termes de déplacement, de déformation et de contraintes de Von-Mises. Cela a permis de mieux décrire et

comprendre le comportement statique du suiveur sous des chargements critiques de vent de  $80 \text{ daN/m}^2$  et de la neige  $66.9 \text{ daN/m}^2$ .

- Les parties les plus fragiles dans les structures des suiveurs sont localisées pour le NSSS2 d'une part au niveau du contact entre le support de la grille et la chape de l'amortisseur hydraulique et de l'autre part, entre le support de la grille et les chapes du vérin hydraulique. Mais pour le MS-2, le point le plus fragile est localisé au niveau du contact du support de la grille et du vérin mécanique d'actionnement électrique.
- La sollicitation du système de suiveur NSSS2 pour les différentes positions de captation du rayonnement solaire de  $0$  à  $50^\circ$ , montre que le système de suiveur est stable car tous les coefficients de sécurité sont égaux à  $8.15$  et  $2.96$  respectivement. De même les facteurs de sécurité du système de suiveur MS-2 pour les deux positions extrêmes  $0^\circ$  et  $60^\circ$  sont  $2.15$  et  $5.81$ . Les résultats de simulation, montrent que les structures des deux suiveurs sont statiquement stables et les matériaux choisis ont des propriétés mécaniques admissibles du point de vue poids, résistance et flexibilité ainsi que du point de vue usinabilité et disponibilité sur le marché.

Les résultats de l'analyse libre caractérisés par les dix premières modes du suiveur NSSS2 développé ont permis de tirer un certain nombre d'enseignements très utiles à la conception.

- Tous les modes de vibration du NSSS2 sont des modes de flexion pairs conjugués autour de l'axe Z en phase ou en opposition de phase dans le plan XY. Ce résultat est en bon accord avec la théorie de la flexion des plaques et des poutres à l'exception du septième mode qui est un mode de torsion autour de l'axe X dans le plan YZ.
- Les déformés modales augmentent avec l'augmentation de l'angle d'élévation du suiveur sous l'influence des déflexions du support en V du suiveur.
- Les fréquences propres du suiveur sont identiques pour chaque mode de vibration et augmentent d'une manière logarithmique avec le numéro du mode. Cela est en bon accord avec la théorie. Les différentes postures du suiveur en élévation n'ont aucune influence sur les fréquences propres à cause de la répartition symétrique de l'inertie.
- Les facteurs d'amortissement modal sont très proches des valeurs généralement admis par les règles de l'art de la conception des structures métalliques (1-10%).

- Les taux des participations massiques des modes propres sont faibles, inférieurs à 10%, ainsi les modes n'ont pas une grande influence sur l'état de santé dynamique de la structure du suiveur et cela pour les différentes élévations. En particulier le mode 8 présente un TPM élevé dépassant les 30% cela peut induire une source de perturbation ce qui nécessite une régulation adéquate.
- Les facteurs de qualité sont dans la gamme (5.1938-5.525) et les rapports des amplitudes de résonance diminuent progressivement avec l'augmentation des fréquences de résonance de (100%, 94.6873%,...14.2111%).

L'examen des indices de performance du suiveur précité, sont dans les normes de la dynamique des structures et par conséquent la stabilité et la fiabilité de la structure sont confirmées.

- L'analyse dynamique forcée du suiveur présente les mêmes caractéristiques dynamiques en fréquences et en modes propres que l'analyse modale avec des facteurs de sécurité dynamiques variant de 1.27 à 5 qui sont acceptables du point de vue résistance et coût des matériaux de construction. On peut conclure que la stabilité et la fiabilité du suiveur sont démontrées avec satisfaction et la qualité de la conception a réussi.

Toutefois, les travaux de cette thèse sur l'analyse statique et dynamique des deux suiveurs NSSS2 et MS-2 par éléments finis 3D peut être d'une grande aide non seulement pour la conception des suiveurs solaires à grandes échelles mais aussi peut constituer un outil technologique majeur (produit industriel) pour le design des structures dynamiques mécaniques en général.

## **Perspectives**

La prochaine étape de recherche avec la volonté du Dieu sera orientée vers :

- L'analyse de la fatigue cyclique (durée de vie du système)
- Analyse CFD des écoulements sur le NSSS2
- Validation du modèle de simulation numérique 3D à travers l'expérimentation et la comparaison avec d'éventuels travaux qui apparaissent online dans l'avenir.
- Programmation de la fabrication du suiveur NSSS2 à l'Entreprise des Réalisations Industrielles à Seriana (Batna) en fonction des moyens financiers de l'URERMS d'Adrar.

# **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## Références bibliographiques

- [ABD, 2008] **Abdelal, G.F., Abou EL-Foutouh, N., et Hamdy, A.**, « *Mechanical fatigue and spectrum analysis of small-satellite structure* » International Journal of Mechanics and Materials in Design, Vol 4 (03) (2008), pp. 265-278.
- [ABU, 2008] **Abu-Khadra, M. M., Badranb, O. O., et Abdallah, S.**, « *Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan* » Renewable and Sustainable Energy Re-views, 12 (2008), pp. 864–873.
- [ACO, 2004] **Acombier**, « *HOWTO- Choix du solveur COSMOSWorks* » SolidWorks© Axemble 2004.
- [ADE, 2013] **ADES Tempero Group**, Manuscript at <http://www.ades.tv/>.
- [AFN, 1994] **AFNOR E90.350**, Méthodes pour l'étalonnage de capteurs de vibrations et de chocs, 1994.
- [ALE, 2012] **Alexandru, C., et Pozna, C.**, « *Simulation of a dual-axis solar tracker for improving the performance of a photovoltaic panel* » Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A J Power Energy, 224 (6) (2012) 797–811.
- [ALL, 2009] **Alleaume A.**, « *Automatic Non-manifold Topology Recovery and Geometry Noise Removal* », Proceedings of the 18<sup>th</sup> International meshing roundtable, Part 4, Pages: 267-279, DOI: 10.1007/978-3-642-04319-2\_16, Edited by Brett W. Clark, 2009.
- [ALY, 2005] **Alyamovskii, A.A., Odintsov, E.V., Ponomarev, N.B., et al.**, « *SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoi praktike* » (SolidWorks. Computer-aided Modeling in Engineering Practice), Moscow: SKR, 2005.
- [BAR, 1996] **Barre, P. J., Hautier, J. P. et Charley, J.** « *The use of modal analysis to improve the axis control* ». Fourth International Congress on Sound and Vibration, St Petersburg, 1996.
- [BEZ, 1986] **Bézier, P.**, « *Mathématiques et CAO : courbes et surfaces* », volume 4 : Hermès, 1986.
- [BHA, 2005] **S. S. Bhavikatti, S.S.**, « *Finite Element Analysis* », New Age International (P) Ltd., Publishers (2005), ISBN (13): 978-81-224-2524-6.
- [BOU, 2010] **Bournival, S.**, « *Automatisation du traitement pour études multidimensionnelles* », Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke (Québec) Canada. Octobre. 2010.
- [BRE, 2010] **Ch. Breyer, Ch. and Schmid, J.**, « *Population Density and Area Weighted Solar Irradiation: Global Overview on Solar Resource Conditions for Fixed Tilted, 1-axis and 2-axes PV Systems* », 25<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 2010, pp. 4692-4709.
- [BUF, 1747] **De Buffon, L.C.**, « *Invention de miroirs ardents, pour brusler à une grande distance* » Mémoire de l'Académie Royale des Sciences / CNRS-CRHST, 1747.
- [CHA, 2007] **Chakhari, J.**, « *Modélisation d'une fixation par éléments filetés d'une structure à forte excentration de chargement et soumis à des sollicitations en fatigue* ». Thèse de Doctorat N° 873, L'INSAT et de L'ENIT de Tunis, Juillet 2007.

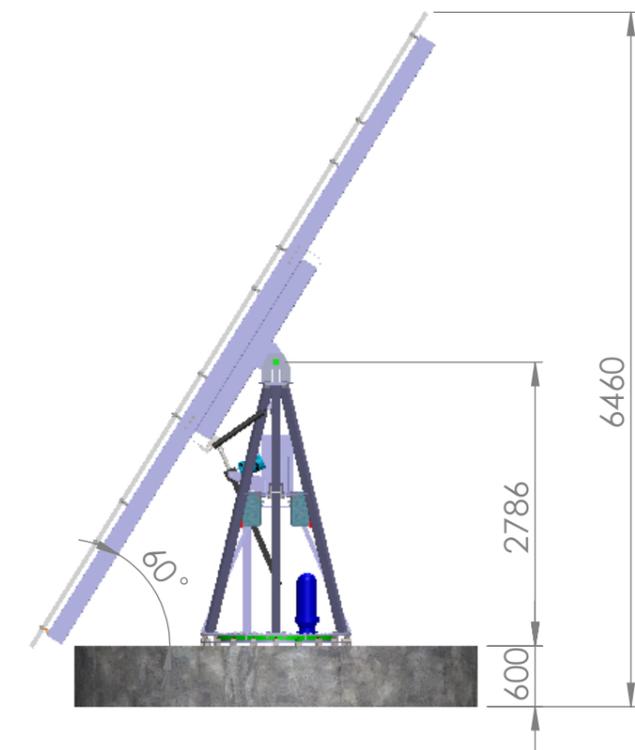
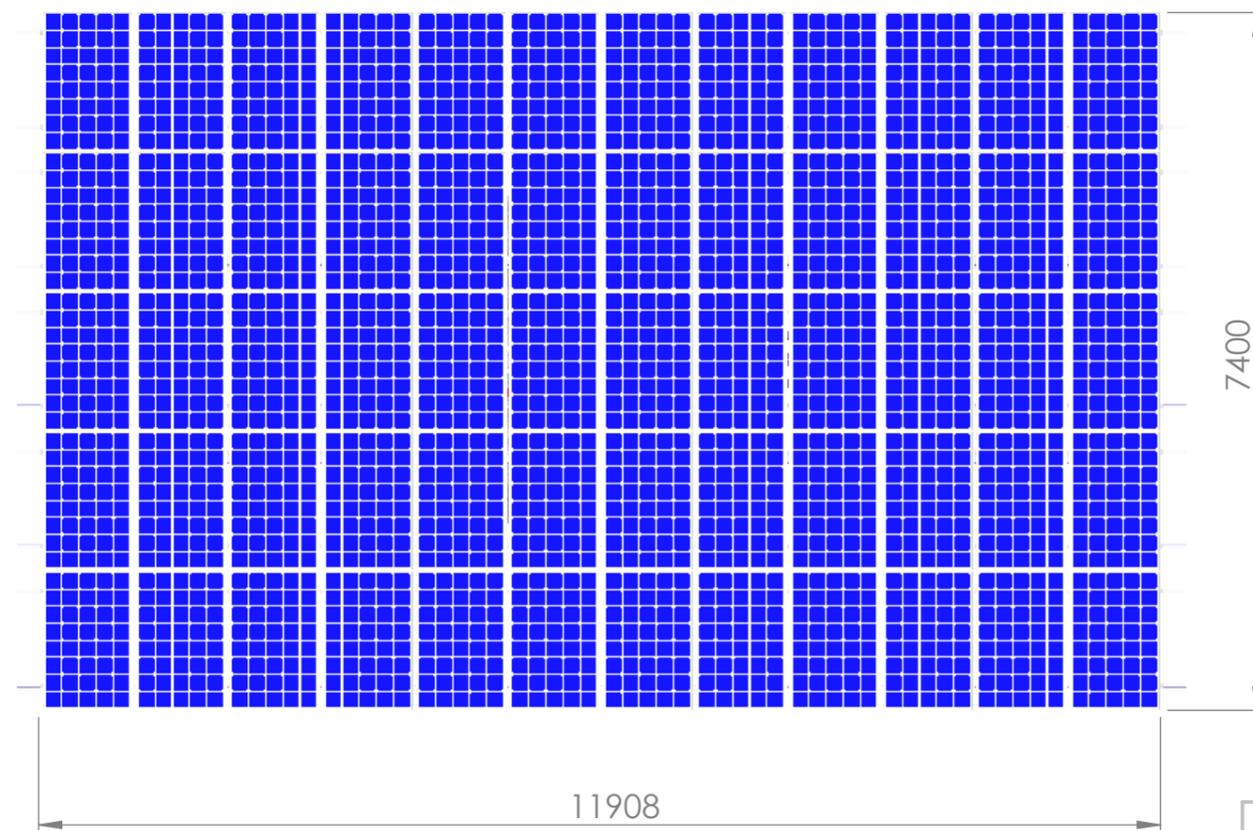
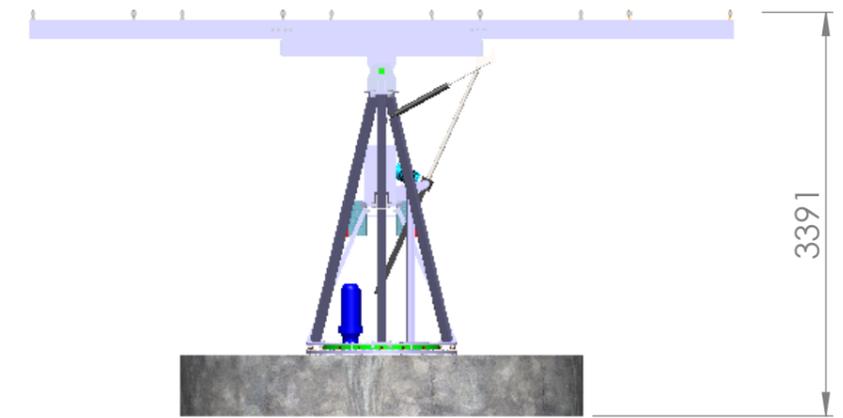
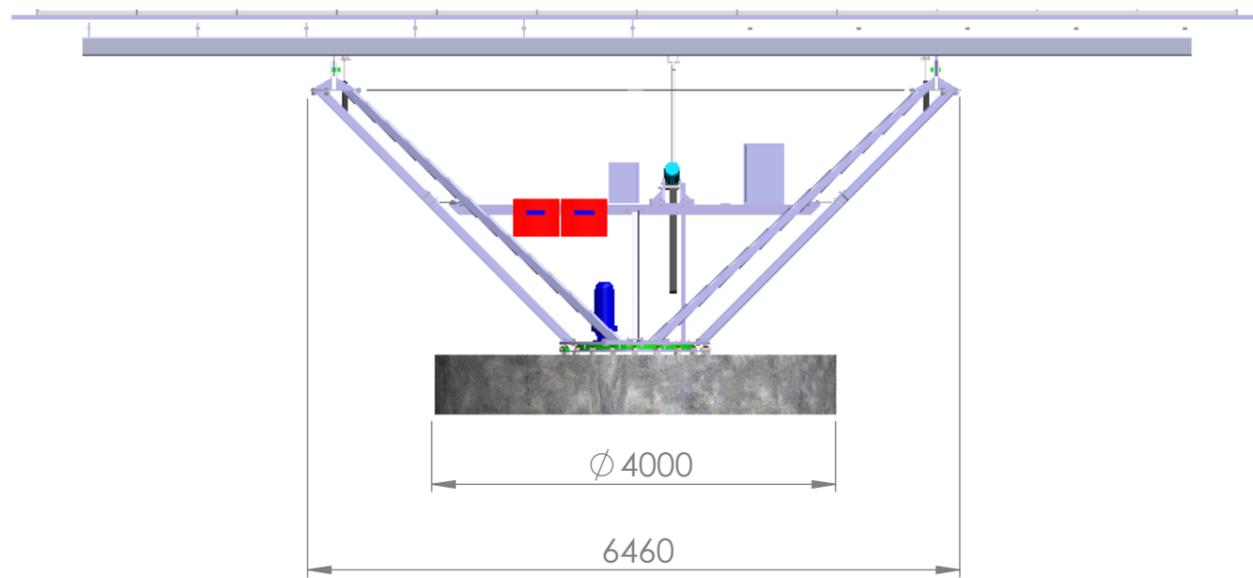
- [CHERIF, 2014] **Chérif Khélifi, M. Ouali, F. Ferroudji & L. Adjlout** « *Modeling and Static Analysis of an Aero-generator Savonius Cracked by Using SolidWorks/COSMOSWorks* » Applied Mechanics and Materials Vols. 446-447 (2014) pp. 744-750 Trans Tech Publications, Switzerland.
- [CHO, 2004] **Choi, S.H., et Chan, A.M.M.**, « *A virtual prototyping system for rapid product development* », Computer-Aided Design, Volume 36, Issue 5, April 2004, Pages 401-412.
- [CHO] **Chong, K.K., et Wong, C.W.**, « *General Formula for On-Axis Sun-Tracking System* » Université Tunku Abdul Rahman, Malaysia.
- [CHO, 2007] **Chopra, A.**, « *Dynamics of structures* ». Pearson Hall, New Jersey, 2007.
- [CLO, 1960] **Clough, R. W.**, « *The finite element method in plane stress analysis* ». Proc. 2<sup>nd</sup> ASCE Conf. on Electronic Computation, Pittsburgh, Pa; 1960. p. 345.
- [COO, 1985] **Cook N.J.**, « *The Designers Guide to Wind Loading of Building Structures* », BRE, Butterworths, Part 1, 1985, (371pages) and Part 2, 1990, (586 p)
- [COS, 2004] **COSMOS**. 2004. « *Introducing COSMOSWorks* » Structural Research and Analysis Corp. (SRAC). Dassault Systemes S.A.
- [COS, 2008] **COSMOSWorks** Product Document 2008. « *COSMOSWorks Professional 2008 Training Manual* », Document Number: PMT0181-ENG.
- [CRA, 2008] **Craveur, J-C.**, « *Modélisation des éléments finis* », 3<sup>ème</sup> édition DUNOD, 2008.
- [DAS, 2013] **Dassault Systemes**, Manuscript at <http://www.solidworks.com/>.
- [DEV, 2003] **Deviprasad, T., T. Kesavadas, T.**, « *Virtual prototyping of assembly components using process modeling* », Journal of Manufacturing Systems, Volume 22, Issue 1, 2003, Pages 16-27.
- [DIA, 2009] **Dianliang, W., Yong H., Xiumin F.**, « *Visual simulation for granular rocks crush in virtual environment based on fractal geometry* », Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 17, Issue 7, August 2009, Pages 1254-1266.
- [DI, 2010] **Di Monaco F., and Tornincasa S.**, « *The future and the evolution of CAD* », 14<sup>th</sup> International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, TMT 2010, Mediterranean Cruise, 11-18 September 2010.
- [DTR, 2000] **Document Technique Réglementaire**, « *Règlement neige et vent " R.N.V.1999"* » ISBN : 9961-845-03-X. 2000.
- [DUD, 2009] **Dudnikov, E. E.**, « *Universal Software Packages to Model the Distributed-parameter Systems* ». Journal Automation and Remote Control, 2009, Vol. 70, N°1, pp. 1-19.
- [EDW, 2002] **Edward, L.W.**, « *Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures a Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering* ». Edited by CSI, Inc., USA. 2002. ISBN: 0-923907-00-9.
- [EL-ASH, 2010] **El-Ashry, M.**, « *Renewables 2010 Global Status Report* », (Paris: REN21 Secretariat). Copyright Deutsche (GTZ) GmbH, 2010.
- [EN, 2004] **EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on Structure. General Actions - Part 1-4: Wind Actions**. 2004.
- [EPIA, 2013] **EPIA, European Photovoltaic Industry Association**, Manuscript at <http://www.epia.org/>.

- [FERROUDJI A, 2014] **F. Ferroudji, F., T. Outtas, T., C. Khélifi et R. Mansouri**, « *Large-scale Dual Axis Sun Tracking System Modeling and Static Analysis by FEM* » International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME/IJENS Vol. 14 (04), 2014, pp. 92-97.
- [FERROUDJI B, 2014] **Fateh. Ferroudji, T. Outtas & C. Khélifi**, « *Design, Modeling and Element Static Analysis of a New Two Axis Solar Tracker Using SolidWorks/COSMOSWorks* » Applied Mechanic and Materials Vols. 446-447 (2014) pp. 738-743 Trans Tech Publications, Switzerland.
- [GEN, 2009] **Genta, G.**, « *Vibration Dynamics and Control* », Springer Science + Business Media, LLC 2009. DOI: 10.1007/978-0-387-79580-5.
- [GER, 1978] **Gerbault, L.**, « *Dynamique des structure* », École nationale des ponts et chaussées, Tome 1, édition 1978.
- [GAW, 2008] **Gawronski, W.K.**, "Advanced structural dynamic and active control of structure", Springer-Verlag, New York, Berlin Heidelberg, pp. 113-123, 2008, [www.springer-ny.com](http://www.springer-ny.com)
- [HOF, 2008] **Hoffmann, A., Frindt, H., Spinnler, M., Wolf, J., Sattelmayer, T. et T. Hartkopf, T.**, « *A Systematic Study on Potentials of PV Tracking Modes* », Proceedings of the 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, 2008, pp. 3378–3383.
- [HUL, 2008] **Huld, T., Šuri, M. and D. Dunlop, D.**, « *Comparison of Potential Solar Electricity Output from Fixed-Inclined and Two Axis Tracking Photovoltaic Modules in Europe, in Progress in Photovoltaic* » Research and Applications, 2008, Vol. 16, pp. 47-59.
- [IEA, 2006] **Report IEA (International Energy Agency)**. « *Trends in photovoltaic application* ». PVPS T1- 15, 2006.
- [IMB, 2007] **Imbert, J-F.**, « *Analyse des structures par éléments finis* », Ed. CEPADUES, 3<sup>ème</sup> édition CEPADUES, 2007.
- [ISO, 1998] **ISO 4355**, « *Détermination de la charge de neige sur les toitures* ». Genève, ISO, 2<sup>ème</sup> édition, 1998.
- [JAN, 2007] **Janat, Y.**, « *Commande crone monovariable et multivariable de systèmes peu amortis* » Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III-Paul Sabatier, 30 Novembre 2007.
- [JAG, 2013] **Jagoo, Z.**, « *Tracking Solar Concentrators* » Springer Briefs in Energy, DOI: 10.1007/978-94-007-6104-9\_3, © The Author(s) 2013.
- [KER, 2003] **Kéribin, C.**, « *Conception et visualisation d'objets* », Notes du cours de Christine Kéribin, rédigées par Pierre Pansu, Février 2003.
- [KHÉLIFI A, 2014] **Khelifi, Ch., Ouali, M., Ferroudji, F., and Adjlout, L.**, « *Modal Analysis of a Small Savonius Aerogenerator by Using SolidWorks Simulation* », Proceeding 14th International Conference Research and Development in Mechanical Industry, RaDMI-2014, 18-21 Sep. 2014, Topola, Serbia.
- [KHÉLIFI B, 2014] **C. Khélifi, M. Ouali, F. Ferroudji & L. Adjlout** « *Severity of Cracks Growths on Static Design of a Three Bladed Savonius Wind Turbine Using SolidWorks Simulation* » International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME/ IJENS Vol. 14(05) pp. 80-83, 2004.
- [KLA, 2012] **J. Klapp, J., et al.**, « *Experimental and Theoretical Advances in Fluid Dynamics* », Environmental Science and Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, DOI: 10.1007/978-3-642-17958-7\_35.

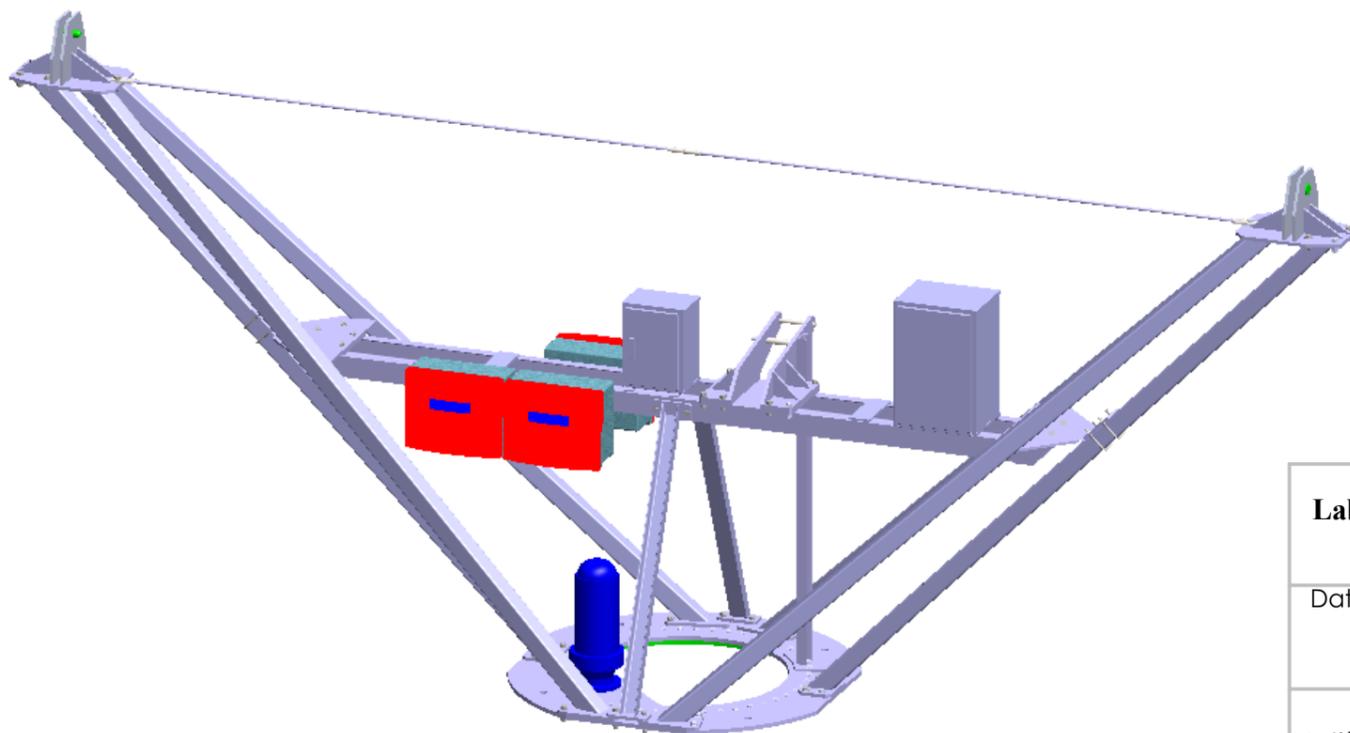
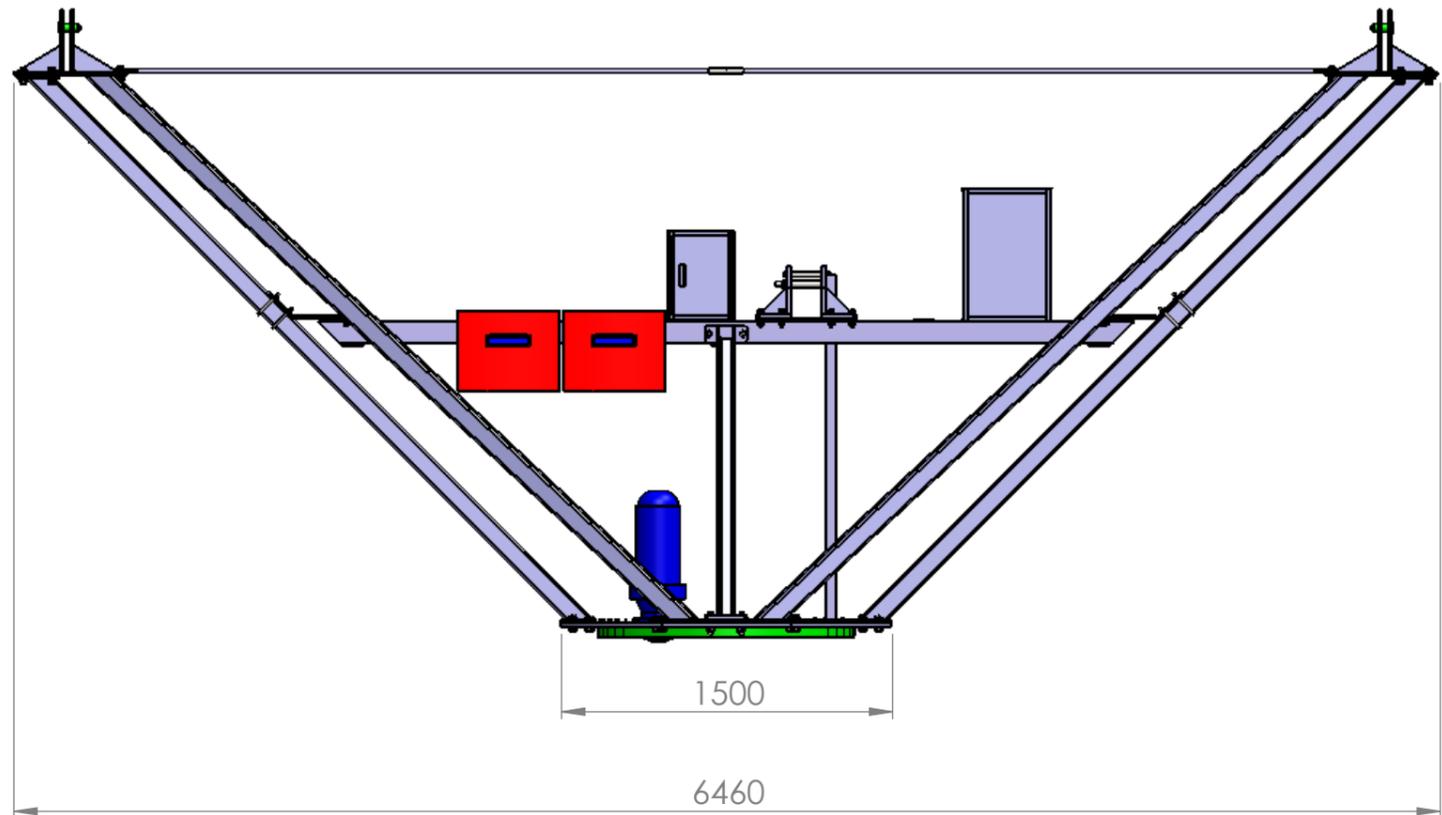
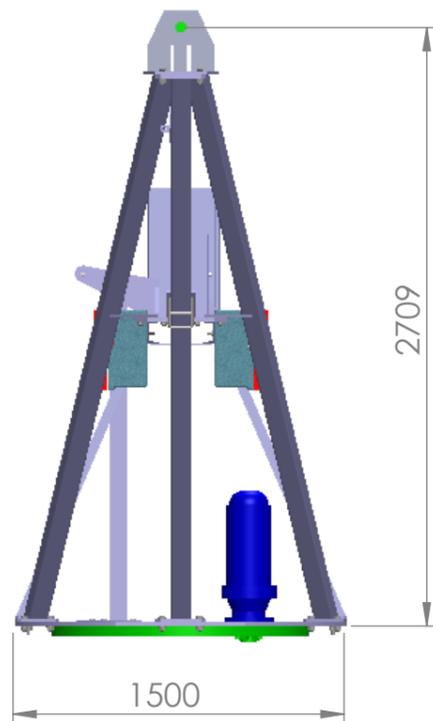
- [KUA, 2006] **Kuate, G.**, « *Analyse d'activités de conception: contribution à la traçabilité des intentions de conception dans les modèles CAO* », Thèse de doctorat de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard et de l'université de Franche-Comté, 15 Décembre 2006.
- [LAC, 1987] **Lacour P.G.**, « *Mathématiques et CAO* », volume 3 : calculs scientifique, Hermès, Paris 1987.
- [LAG, 1759] **Lagrange, J.L.**, « *Recherches sur la nature et la propagation du son* ». Miscellanea Taurinensia, t. I, 1759.
- [LIA, 2011] **Liao, X., Ma, X. et Zuo, Y.**, « *Design of Rotary Root Stubble Digging Machine Based on SolidWorks* », CCTA 2010, Part I, International Federation for Information Processing AICT 344, pp. 532-538, 2011.
- [MEC, 2009] **Mecasolar**, « *Solar Tracker MS-2 Tracker 10 and 10+* », Version 4.1, Patent invention N°: P200900602. [www.mecasolar.com](http://www.mecasolar.com).
- [MEC, 2013] **Mecasolar**, Manuscript at [www.mecasolar.com](http://www.mecasolar.com).
- [MEN, 2003] **Meniru, K., Rivard H. and Bedard C.**, « *Specifications for computer-aided conceptual building design* », Design Studies, Vol 24, 2003, pp 51-71.
- [MOU, 2009] **Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K.A. and Sharifi, A.** « *A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output* », Renewable and sustainable energy reviews, Vol 13, pp. 1800-1818, 2009.
- [MUN, 2003] **Muna, D., Hana S., Kima J., Ohb Y.**, « *A set of standard modeling commands for the history-based parametric approach* », Computer-Aided Design, 35, 2003, pp 1171-1179.
- [MUR, 2005] **Murkowski, M.P.** « *Engineering Analysis with COSMOSWorks Professional* ». Schroff Development Corporation, SDC, 2005, USA. ISBN: 1-58503-249-2.
- [NES, 1972] **NEST** : Nouvelle Encyclopédie Des Sciences Et Techniques, 1972.
- [OÑA, 2009] **Oñate, E.**, « *Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Static* ». Volume 1. Basis and Solid, International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). Barcelona, Spain, March 2009.
- [PAR, 2004] **Parallax**, « *Experiments with Renewable Energy Student Guide* », version1.2004.
- [PÉR, 2004] **Pérignon. F.**, « *Vibrations Forcées de Structures Minces, Élastiques, Non Linéaires* », Thèse de Doctorat de l'Université Aix-Marseille II, 2004.
- [PIE, 2005] **Piegl, L. A.**, « *Ten Challenges in computer-aided design* », Computer-Aided Design 37, 2005, pp 461-470.
- [RAZ, 2010] **Razafindrazato, G.M.R.**, « *Méthodes numériques pour la caractérisation vibratoire de structures complexes* », Thèse de Doctorat de l'Université Paris Est Créteil, 2010.
- [REN, 2013] **Renewables Academy (RENAC)**, « *ReGrid: Énergie solaire à concentration* », Manuscript at <http://www.renac.de/en/projects/regrid/>.
- [SEM, 2011] **Seme, S., and Stumberger, G.**, « *A novel prediction algorithm for solar angles using solar radiation and differential evolution for dual-axis sun tracking purposes* » Solar Energy 85 (11) (2011) 2757–2770.
- [SIU, 2001] **Siu, N.W.C., Dilnot, C.**, « *The challenge of the codification of tacit knowledge in designing and making: a case study of CAD systems in the Honk Kong jewellery industrie* », Automation in Construction 10, 2001, pp. 701-714.

- [SOL, 2010] **SolidWorks.** 2010. « *Introduction aux applications d'analyse des contraintes avec SolidWorks Simulation, Guide de l'enseignant* » Dassault Systèmes SolidWorks Corporation.
- [SON, 2009] **Songbai C., Guohua C., Qingguang C., Xueying X.,** « *Research on 3D dynamic visualization simulation system of toxic gas diffusion based on virtual reality technology* », *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 87, Issue 3, May 2009, Pages 175-183.
- [STR, 1998] **J.W., Strutt, J.W.,** (Baron Rayleigh). « *Theory of sound* », Vol. 1. Dover Publications Inc., 1998 (première édition en 1877).
- [TAO, 2012] **Tao, L., Shaohua, L., Hu, W., Deyong, C., Guangcai, Q., and Jianfeng, Y.,** « *Dynamic Simulation on the Installation Process of HGIS in Transformer Substation* », International conference on Applied Physic and Industrial Engineering, *Physics Procedia* 24 (2012) pp. 297-302.
- [TUR, 1956] **Turner, M. Clough, R. Martin, H. Topp, L.,** « *Stiffness and deflection analysis of complex structures* ». *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1956; 23:805-23.
- [UNI, 2014] **Unique Innovations,** Manuscript at <http://www.unitions.com/>.
- [WIL, 2002] **Wilson E. L.,** « *Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures a Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering* », CSI, Inc, USA, 2002.
- [XU, 2005] **Xu X.W., Galloway R.,** « *Using Behavioral Modeling Technology to Capture Designer's Intent* », *Computer in human Behavior* 21, 2005, pp 395-405.

# **Annexe de Chapitre 3**



<b>Laboratoire de Mécanique des Structures et Matériaux.</b> <b>Université de Hadj Lakhder Batna. Algeria</b>		 <b>LaMSM</b> Laboratoire de Mécanique des Structures et Matériaux	 <b>URER-MS</b>
Date:	17/03/2014	D-PAR	<b>FATEH FERROUDJI</b>
Matière:	/	V-PAR	DESIGNATION
Echelle:	1:70	Masse:	<b>Suiveur Solaire à Deux Axes MS-2 TRACKER 10+</b>



Laboratoire de Mécanique des Structures et Matériaux.  
Université de Hadj Lakhder Batna. Algeria

Date: 17/03/2014

D-PAR  
**FATEH FERROUDJI**

Matière: /

V-PAR

Echelle: 1:32

Masse:



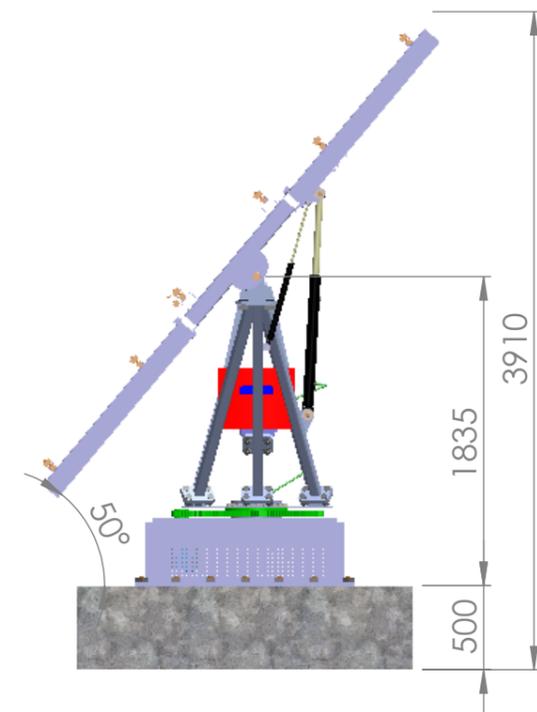
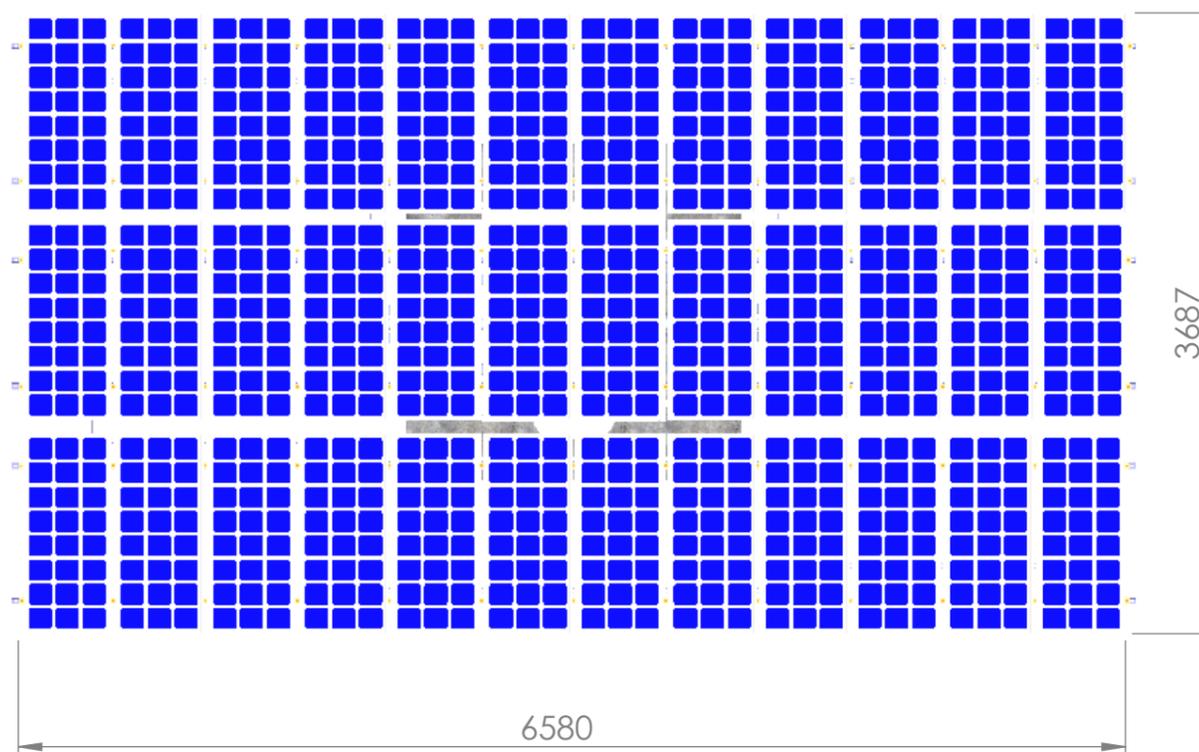
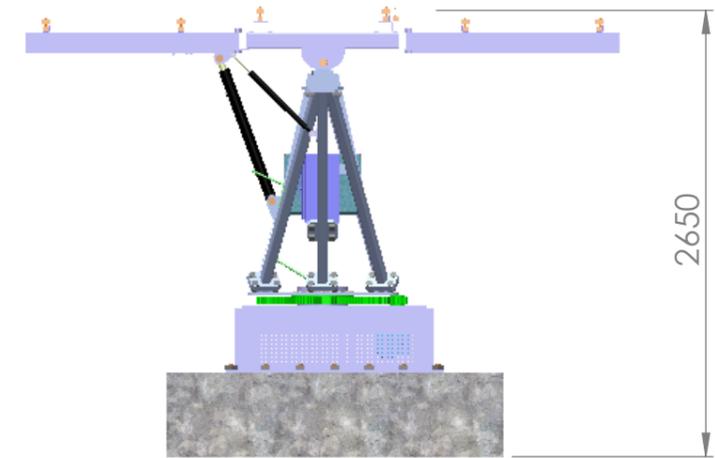
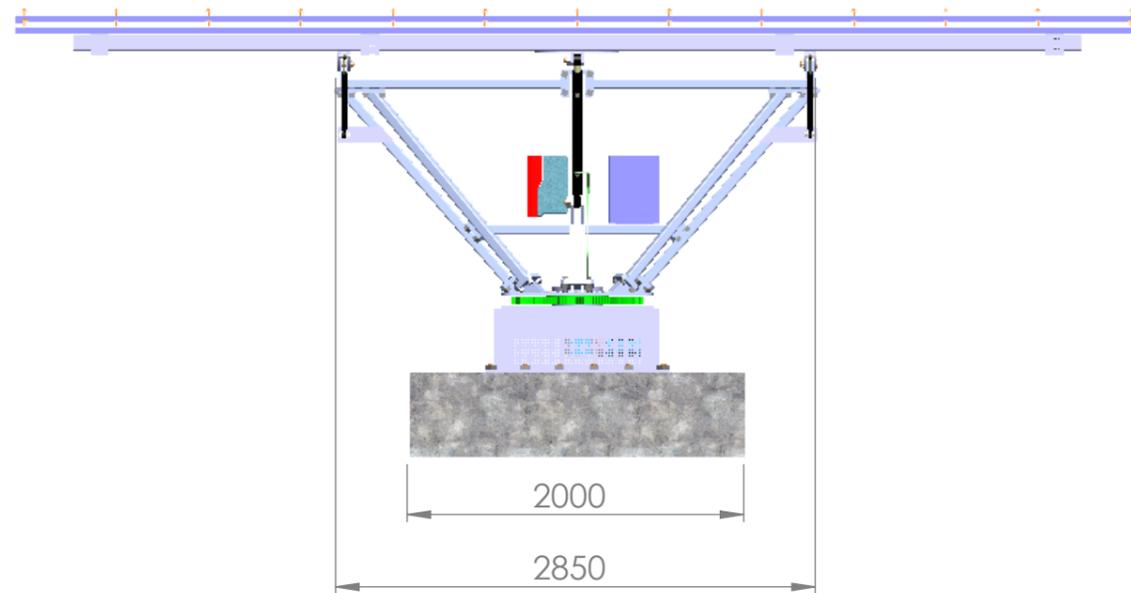
**LaMSM**



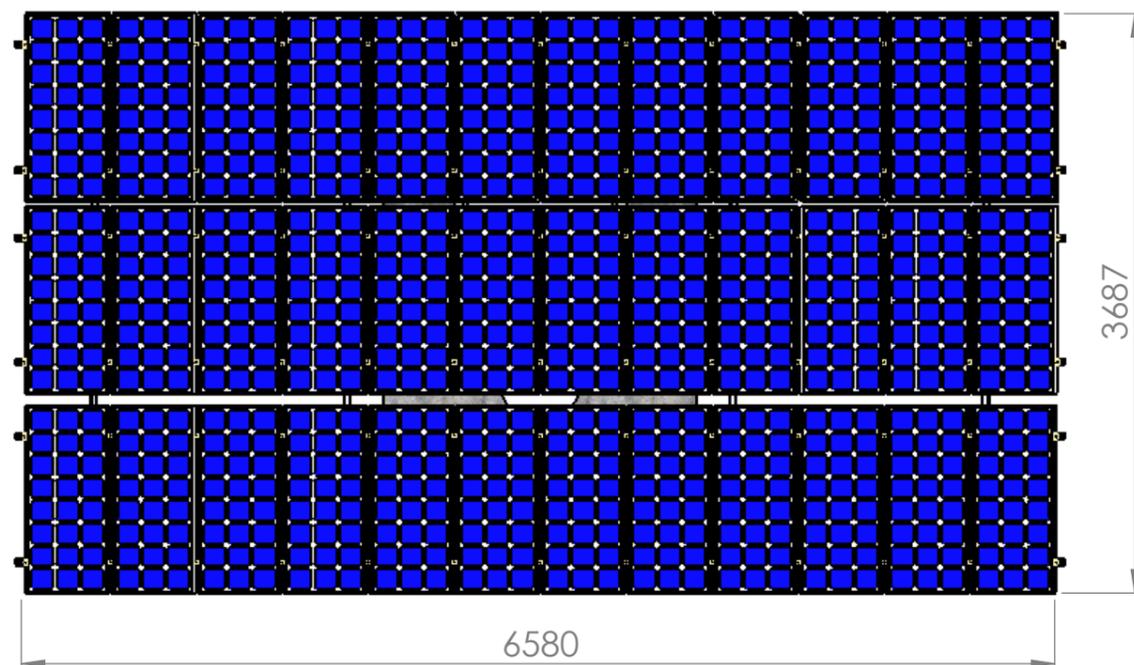
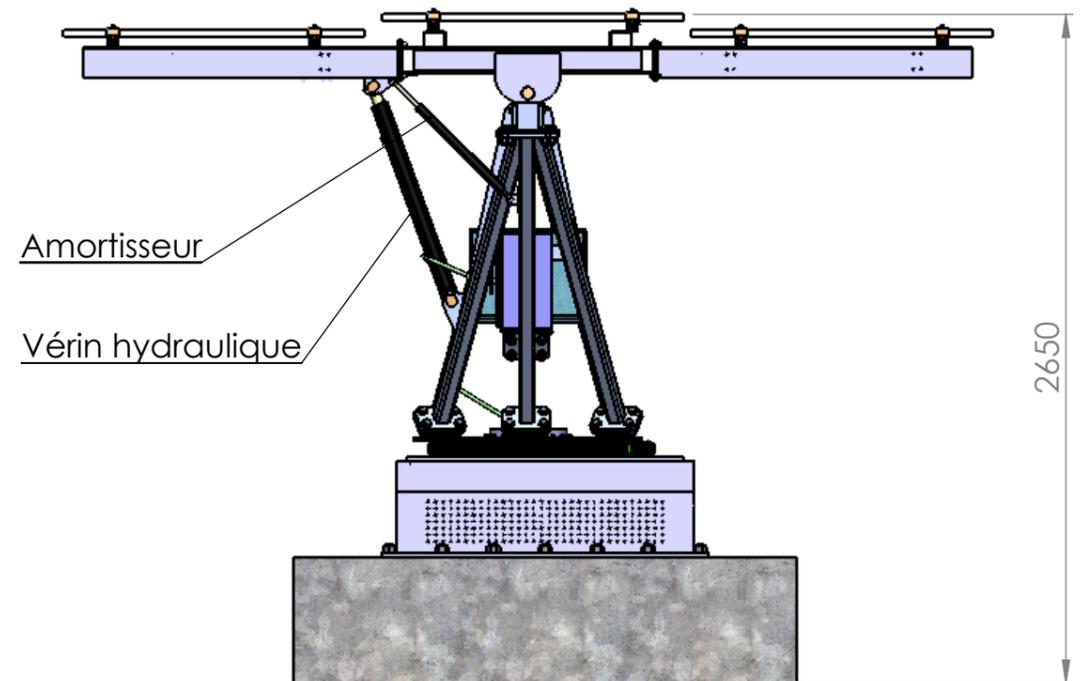
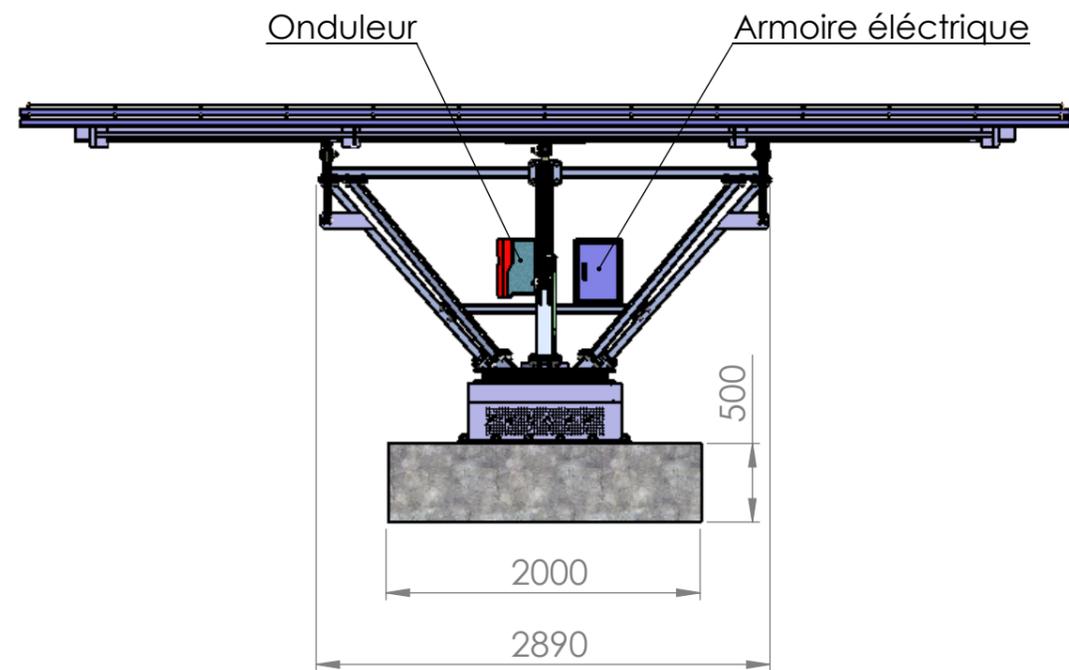
**URER-MS**

DESIGNATION

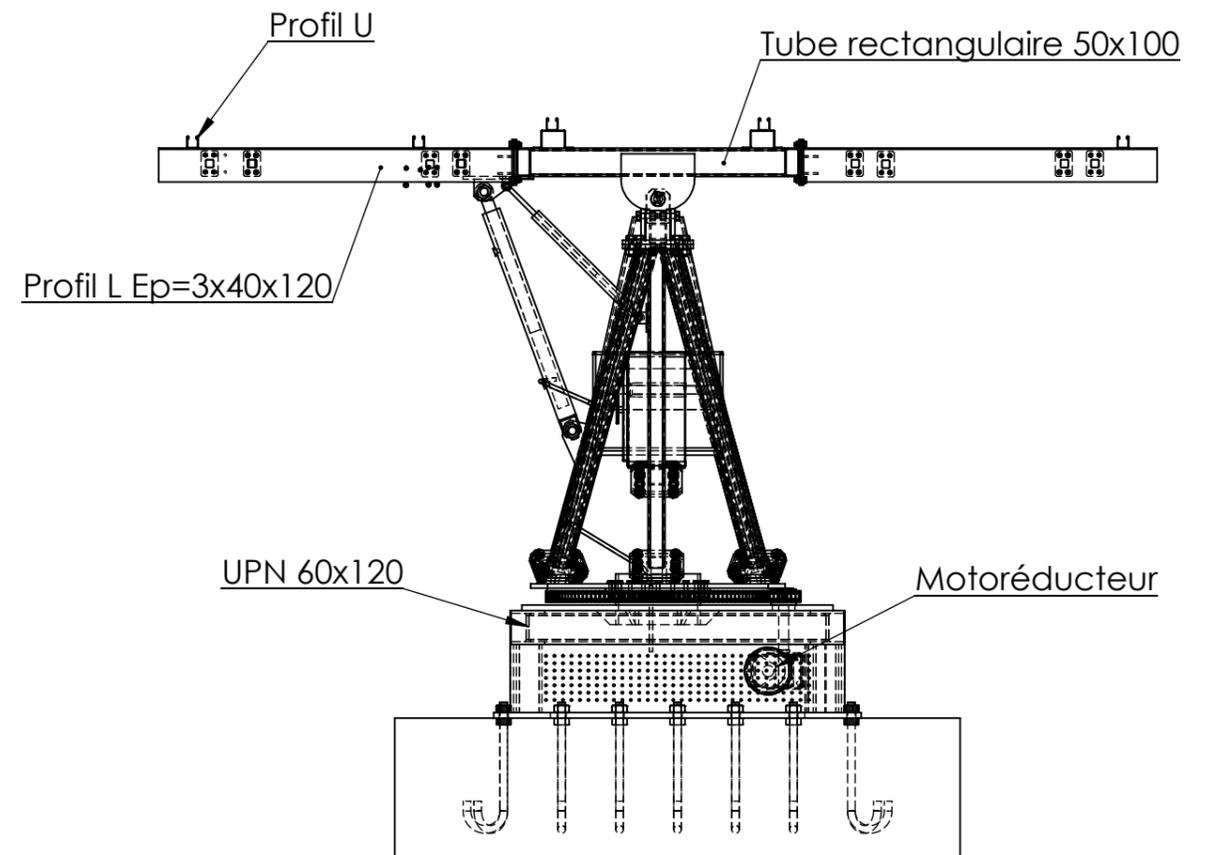
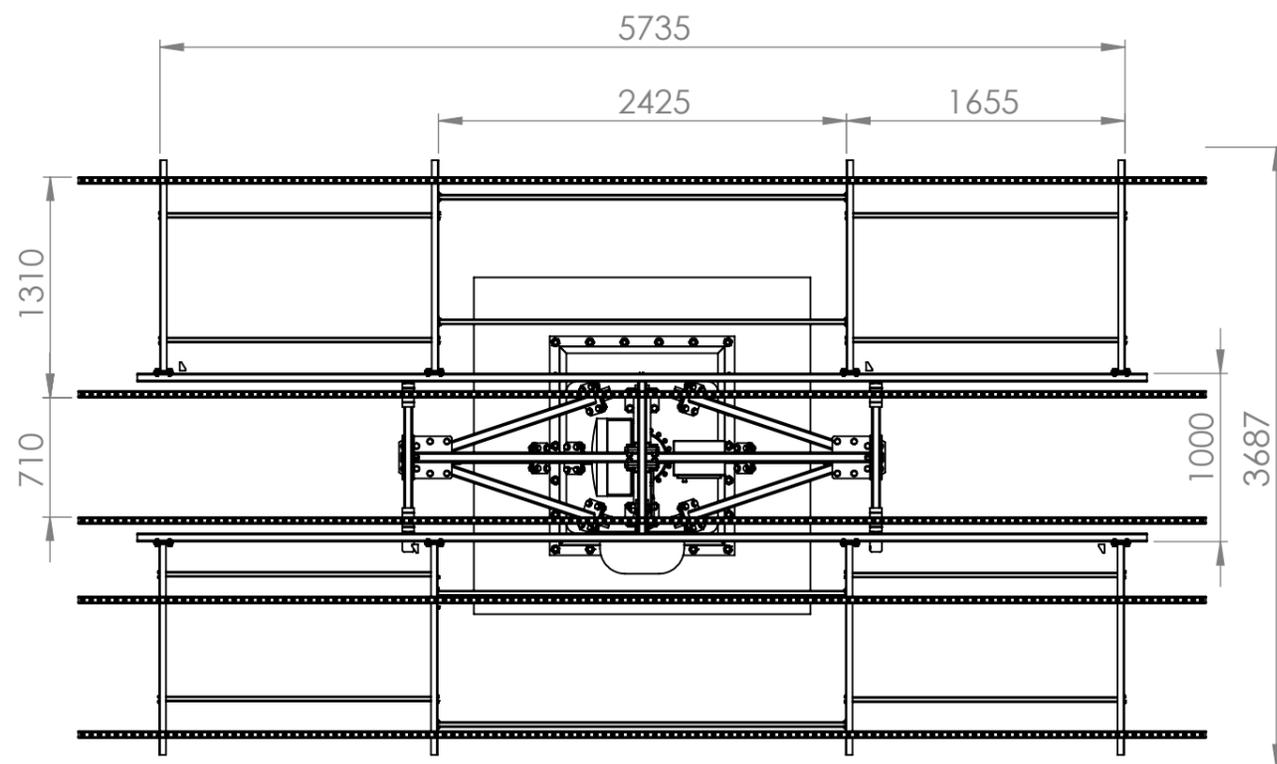
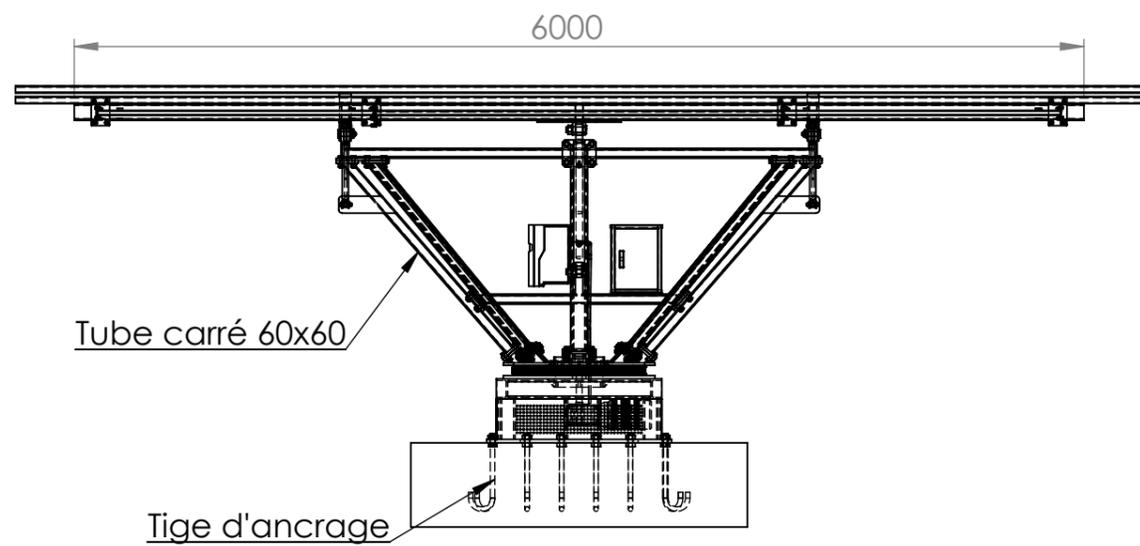
**SUPPORT EN V-MS-2 TRACKER 10+**



<b>Laboratoire de Mécanique des Structures et Matériaux.</b> <b>Université de Hadj Lakhder Batna. Algeria</b>		 <b>LaMSM</b> Laboratoire de Mécanique des Structures et Matériaux	 <b>URER-MS</b>
Date:	17/03/2014	D-PAR	<b>FATEH FERROUDJI</b>
Matière:	/	V-PAR	DESIGNATION
Echelle:	1:40	Masse:	<b>Nouveau Suiveur Solaire à Deux Axes</b>



<b>Laboratoire de Mécanique des Structures et Matériaux.</b> <b>Université de Hadj Lakhder Batna. Algeria</b>		 <b>LaMSM</b> Laboratoire de Mécanique des Structures et Matériaux	 <b>URER-MS</b>
Date:	09/11/2014	D-PAR	<b>F FERROUDJI</b>
Matière:	/	V-PAR	DESIGNATION
Echelle:	1:40	Masse:	<b>NOUVEAU SUIVEUR SOLAIRE A DEUX AXES</b>



Laboratoire de Mécanique des Structures et Matériaux.  
Université de Hadj Lakhder Batna. Algeria

Date: 09/11/2014

D-PAR

**F FERROUDJI**

Matière: /

V-PAR

Echelle: 1:40

Masse:



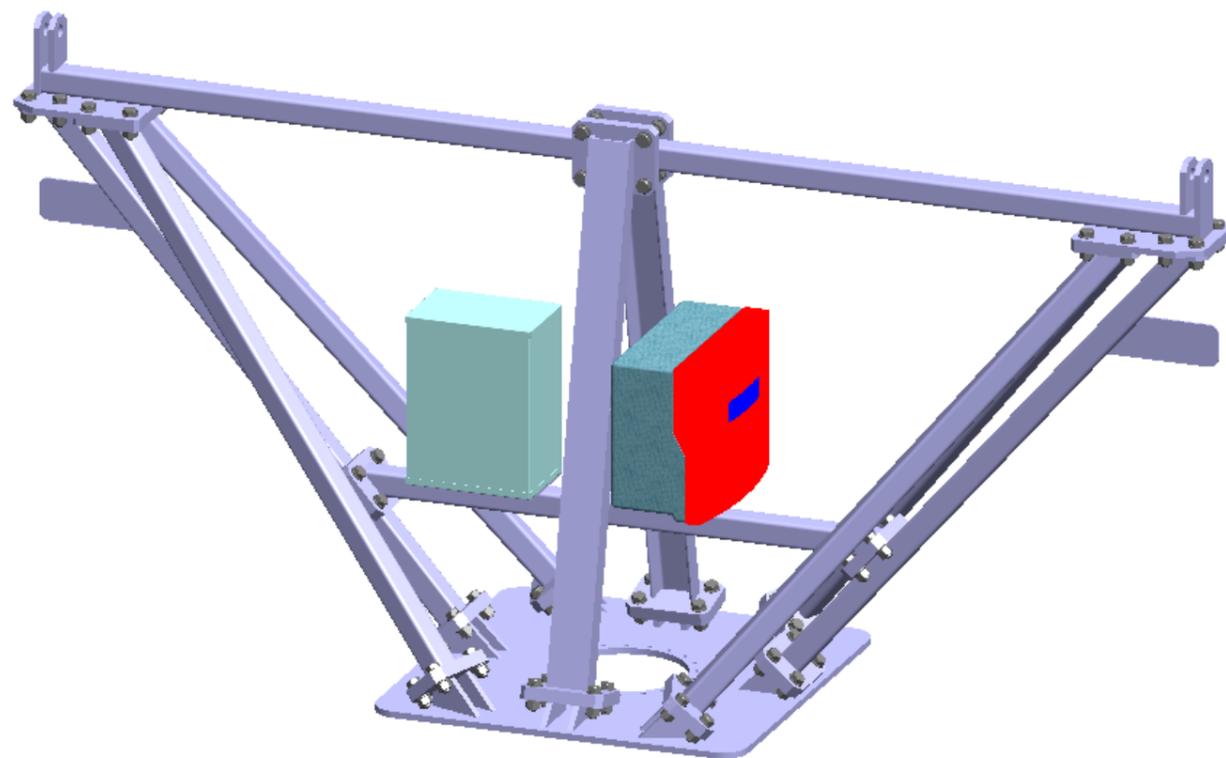
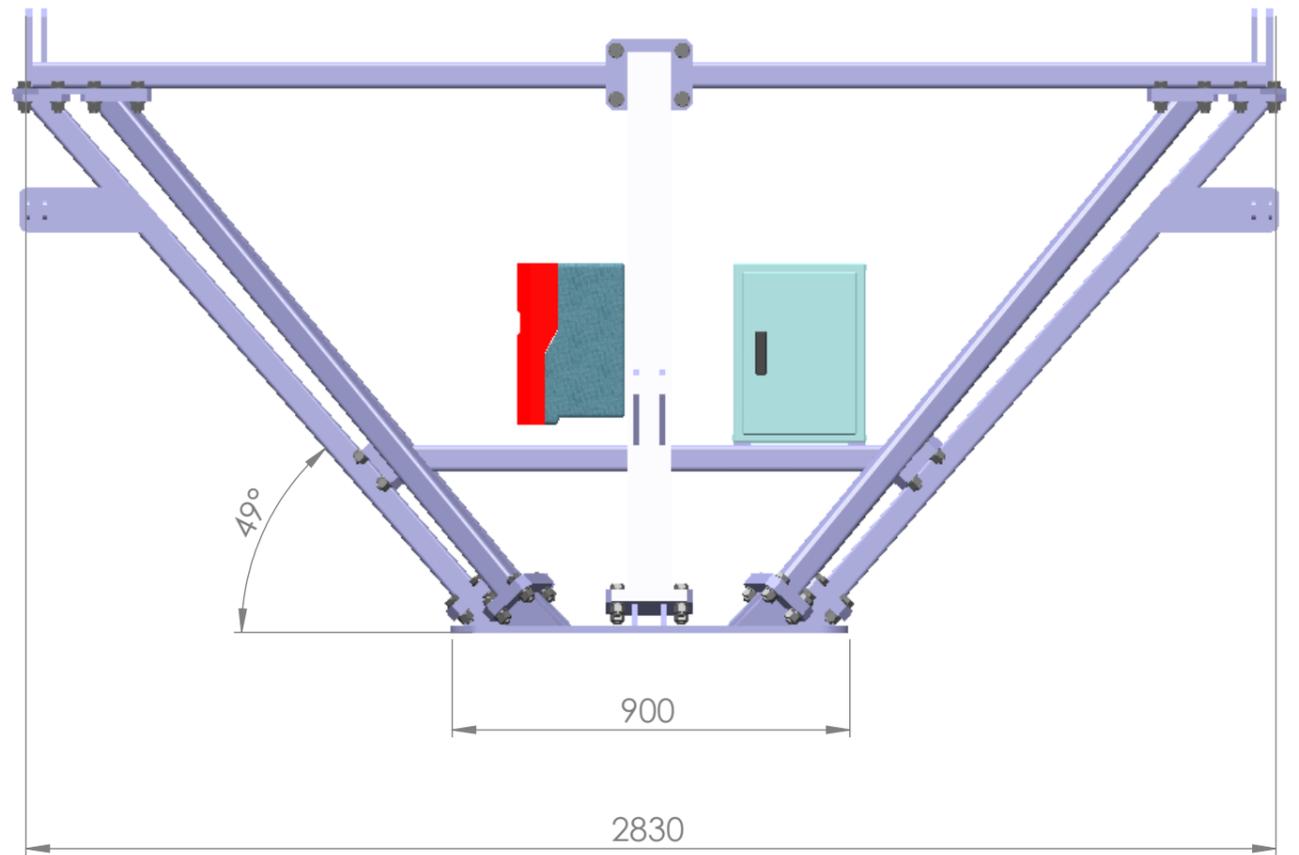
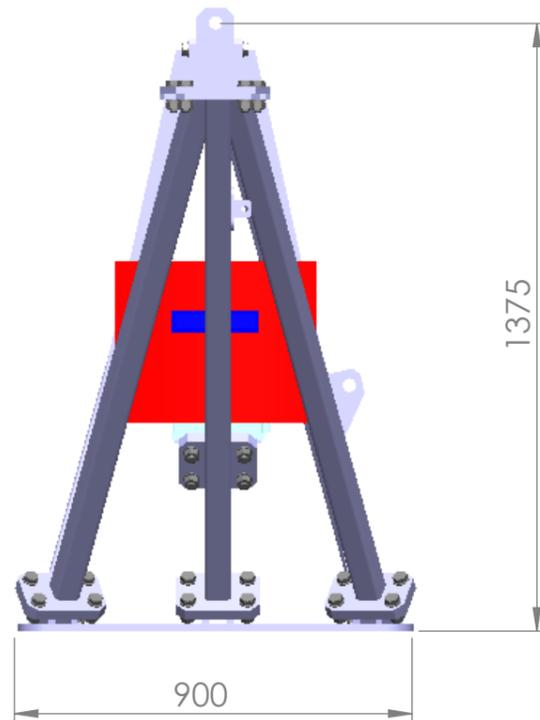
**LaMSM**

**URER-MS**

DESIGNATION

**NOUVEAU SUIVEUR SOLAIRE  
A DEUX AXES**

Réf: 2



Laboratoire de Mécanique des Structures et Matériaux.  
Université de Hadj Lakhder Batna. Algeria

Date: 17/03/2014

D-PAR  
**FATEH FERROUDJI**

Matière: /

V-PAR

Echelle: 1:16

Masse:



**LaMSM**



**URER-MS**

DESIGNATION

**SUPPORT EN V - Nouveau Suiveur  
Solaire à Deux Axes**

# **Annexe de Chapitre 4**

## Annexe 4-1 : Calcul la charge du vent

Le calcul de la charge du vent est la première donnée importante pour l'analyse mécanique. Cette charge est évaluée par les pressions ou par les forces ; son effet sur des structures est selon les propriétés de vent (comme la vitesse moyenne, les caractéristiques de turbulence, le facteur dynamique), les caractéristiques de la structure (forme, taille, orientation), les propriétés dynamiques de la structure et l'endroit [EN 1991-1-4].

Les actions du vent sur les structures et les éléments structuraux seront déterminées en considérant des pressions, externes et internes de vent. La pression du vent agissant sur les surfaces externes ou les surfaces internes est obtenue à partir de l'expression suivante :

$$P = 0.5 \cdot C_d \cdot \rho_{air} \cdot v_{Vent}^2 \quad (A.1)$$

### A4.1 Zones du vent

Pour l'obtention des zones du vent, on a recours à la notion de vitesse de référence du vent. Celle-ci est définie de la manière suivante :

La vitesse de référence du vent,  $V_{réf}$  est la vitesse moyenne sur dix minutes mesurée dans les conditions conventionnelles avec une probabilité annuelle de dépassement égale à 0,02 (ce qui correspond à une période de retour de 50 ans).

Trois zones de vent ont été définies (zones I, II et III), et les valeurs correspondantes de la vitesse de référence qui ont servi à leur détermination sont présentées dans le Tableau 1.

*Tableau 1 : Valeurs de la vitesse de référence du vent.*

Zone	$V_{réf}$ (m/s)
Zone I	25
Zone II	28
Zone III	31

**Tableau 2 : Zones de vent [DTR, 2000].**

Zone	Wilaya
<b>Zone I</b>	BISKRA, TEBESSA, CHLEF, OUM EL BOUAGHI, BOUIRA, ALGER, JIJEL, SETIF, SIKIKDA, SIDI BEL ABBES, ANNABA, GUELMA, MOSTAGANEM, MASCARA, ORAN, BOUMERDES, EL TARF, TISSEMSILT, SAIDA, SOUK AHRAS, TIPAZA, AIN DEFLA, AIN TEMOUCHENT, RELIZANE, KHENCHELA, TAMANRASSET, ILLIZI, EL OUED, BEJAIA, BLIDA, TLEMCEN, TIZI OUZOU, CONSTANTINE, MEDEA, BORDJ BOU ARRERIDJ, MILA.
<b>Zone II</b>	ADRAR, BECHAR, EL BAYADH, GHARDAIA, M'SILA*, NAAMA, OUARGLA, TIARET, TINDOUF.
<b>Zone III</b>	<i>DJELFA (1140 m)</i> , LAGHOUAT (762 m), M'SILA (471 m) (communes d'Ain El Malh, Djebel Messad et Slim)

## Annexe 4-2: Calcul la charge de la neige

La charge caractéristique de neige  $S$  [kN/m<sup>2</sup>] par unité de surface en projection horizontale de toitures (partie supérieur du système de suiveur) ou toute autre surface soumise à l'accumulation de la neige, est déterminée par l'équation suivante [EN 1991-1-4] :

$$S = \mu_i \cdot S_k \quad (\text{A.1})$$

Où :

$S_k$  = La valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol (en kN/m<sup>2</sup>), qui dépend en général de l'altitude et du type de climat du site.

$\mu_i$  = Le coefficient de forme pour la charge de neige sur la toiture, qui dépend de la pente de cette dernière.

### A4.1 Charge de neige sur le sol

La charge de neige sur le sol  $S_k$  par unité de surface est fonction de la localisation géographique et de l'altitude du lieu considéré.

- i. **Localisation géographique** : la carte neige donne la zone à considérer pour chaque commune du pays.
- ii. **Influence de l'altitude** : La valeur de  $S_k$  en kN/m<sup>2</sup> est déterminée par les lois de variation suivantes en fonction de l'altitude  $H$  (par rapport au niveau de la mer) en  $m$  du site considéré [DTR, 2000]:

$$\text{Zone A} \quad S_k = \frac{0,07 \times H + 15}{100} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{Zone B} \quad S_k = \frac{0,04 \times H + 10}{100} \quad (\text{A.3})$$

$$\text{Zone C} \quad S_k = \frac{0,0325 \times H}{100} \quad (\text{A.4})$$

**Zone D** Pas de charge de neige. Dans cette région, une charge représentant l'ensablement des terrasses

### A4.2 Coefficient de forme

**Cas de charge** : Pour une toiture de forme donnée, les différents cas de charge à considérer sont les suivants :

- Cas I : charge de neige répartie sans redistribution par le vent.
- Cas II : charge de neige répartie après redistribution par le vent.

- Cas III : charge de neige répartie après redistribution et enlèvement partiel éventuel par le vent.
- Cas IV : charge de neige répartie conformément aux cas I, II, III sur une partie de la surface et moitié de cette charge répartie sur le reste de la surface, de manière à produire l'effet le plus défavorable dans l'élément considéré.

**Toiture en pentes :** les coefficients de forme des toitures à un versant sans obstacle de retenue de la neige (la neige est supposée pouvoir tomber librement) sont donnés par le Tableau 1 [ISO, 1998].

*Tableau A.1 : Valeurs du coefficient de forme  $\mu_i$  pour la charge de neige sur la toiture selon la pente de cette dernière.*

$\beta$ (angle du toit avec l'horizontale)	$0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$	$30^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$	$\beta \geq 60^\circ$
$\mu_1$	0,8	$0,8 \cdot (60-\beta)/30$	0,0
$\mu_2$	$0,8+0,8 \cdot \beta/30$	1,6	---

*Tableau A.2 : Zones de Neige [DTR, 2000].*

Zone	Wilaya
<b>Zone A</b>	BEJAIA (660 m), BLIDA (260 m), TLEMCEN (842 m), TIZI OUZOU (200 m), CONSTANTINE (694 m), <b>MEDEA (981 m)</b> , BORDJ BOU ARRERIDJ (928 m), MILA (486 m).
<b>Zone B</b>	CHLEF, OUM EL BOUAGHI, BOUIRA, ALGER, JIJEL, SETIF, SKIKDA, SIDI BEL ABBES, ANNABA, GUELMA, MOSTAGANEM, MASCARA, ORAN, BOUMERDES, EL TARF, TISSEMSILT, SOUK AHRAS, TIPAZA, AIN DEFLA, AIN TEMOUCHENT, RELIZANE.
<b>Zone C</b>	LAGHOUAT, BATNA, BISKRA, TEBESSA, TIARET, DJELFA, SAIDA, M'SILA, EL BAYADH, KHENCHELA, NAAMA.
<b>Zone D</b>	ADRAR, BECHAR, TAMANRASSET, OUARGLA, ILLIZI, TINDOUF (400 m), EL OUED, GHARDAIA.

# **Annexe de Chapitre 6**

## Annexe 6-1 : Les participations massiques de l'analyse dynamique modale

*Tableau 1 : Les participations massique  $\beta = 0^\circ$ .*

N° de Mode	Fréquence (Hz)	Direction X	Direction Y	Direction Z
1	7.9542	7.8233e-005	0.00014553	1.0284e-006
2	8.1743	1.371e-006	0.088465	0.00023512
3	9.0885	0.0016029	0.0039761	1.6123e-005
4	9.1929	6.5778e-005	0.070336	0.00014405
5	11.038	0.0079406	4.2049e-005	2.3873e-007
6	11.779	9.2364e-007	0.063314	0.0064302
7	14.458	8.1773e-006	0.043496	0.0067122
8	16.801	4.8529e-006	1.3665e-005	0.30395
9	17.857	0.016807	2.604e-005	0.00017908
10	21.1	0.0019906	0.015568	1.2107e-005
11	21.212	0.043652	0.00122	8.1815e-008
12	21.464	0.21202	2.3254e-007	9.7893e-005
13	21.519	0.055814	0.00022086	0.00039222
14	21.99	2.7062e-005	0.014551	4.6952e-005
15	24.028	2.5592e-006	0.00089682	0.00035046
16	24.115	8.0496e-006	0.0011524	0.00016939
17	24.44	0.0060179	4.115e-007	4.7964e-006
18	27.231	3.0982e-006	0.0078095	0.00012759
19	27.355	5.614e-006	0.0017071	3.0928e-005
20	27.767	6.3489e-007	5.392e-007	2.0541e-007

*Tableau 2 : Les participations massique  $\beta = 10^\circ$ .*

N° de Mode	Fréquence (Hz)	Direction X	Direction Y	Direction Z
1	7.7841	3.2283 <sup>e</sup> -006	0.0031147	0.00061113
2	8.0333	0.00012743	0.031609	0.00011014
3	8.2006	0.00048468	0.10114	0.0053724
4	8.597	0.00095553	0.028377	0.0022898
5	10.618	0.0041862	9.715 <sup>e</sup> -007	2.2566 <sup>e</sup> -006
6	11.732	9.513 <sup>e</sup> -006	0.08157	0.00091991
7	12.748	0.00013256	0.014628	0.0087223
8	16.764	5.6565 <sup>e</sup> -005	0.0086776	0.29617
9	17.131	0.011705	0.00065212	0.0015817
10	20.483	0.010195	0.0013282	0.00010251
11	20.941	0.00085355	0.019668	0.00039755
12	21.228	0.31649	6.1047 <sup>e</sup> -005	5.6309 <sup>e</sup> -006
13	21.467	0.00032945	2.9617 <sup>e</sup> -005	0.00048844
14	21.848	0.00030786	0.0116	0.0003296
15	24.046	6.3748 <sup>e</sup> -006	0.00062024	0.00027106
16	24.089	4.3073 <sup>e</sup> -005	0.0014445	0.00025448
17	24.173	0.0051943	5.1656 <sup>e</sup> -006	4.8281 <sup>e</sup> -006
18	27.153	5.3245 <sup>e</sup> -006	0.0042243	0.0005763
19	27.203	8.3977 <sup>e</sup> -008	0.0041229	8.599 <sup>e</sup> -005
20	27.721	1.1291 <sup>e</sup> -005	8.7833 <sup>e</sup> -006	6.019 <sup>e</sup> -006

**Tableau 3 : Les participations massique  $\beta = 20^\circ$ .**

N° de Mode	Fréquence (Hz)	Direction X	Direction Y	Direction Z
1	7.8890	6.3351e-005	4.962e-005	7.4694e-006
2	8.0927	2.9732e-007	0.085099	0.0091343
3	8.6966	0.0013564	0.010948	0.0025041
4	8.7393	0.0002811	0.047325	0.010218
5	10.677	0.0041656	1.2783e-005	5.142e-007
6	11.819	1.3174e-006	0.076263	0.00013827
7	13.615	7.6695e-006	0.023781	0.014886
8	16.804	1.3381e-007	0.033917	0.27267
9	17.518	0.01373	2.3302e-006	3.9349e-005
10	20.82	0.00018619	1.1565e-005	2.3352e-006
11	21.026	0.00015875	0.020329	0.002198
12	21.326	0.32341	1.0745e-006	3.7828e-006
13	21.595	5.7151e-006	7.075e-005	0.00039548
14	21.941	6.4291e-005	0.0085441	0.0010896
15	24.154	4.2935e-007	0.00053672	0.00019501
16	24.192	0.00010593	0.0014035	0.00038368
17	24.246	0.0053194	2.9967e-005	2.3194e-005
18	26.819	3.9392e-006	0.0032046	0.00056774
19	27.039	7.1762e-006	0.0030139	0.00037362
20	27.616	5.5762e-007	0.0013447	0.00037302

**Tableau 4 : Les participations massique  $\beta = 30^\circ$ .**

N° de Mode	Fréquence (Hz)	Direction X	Direction Y	Direction Z
1	7.7524	7.2351e-006	0.00027933	0.00075803
2	8.0283	0.00013013	0.021338	0.0036566
3	8.1925	0.00047771	0.078935	0.032232
4	8.5342	0.00096318	0.026603	0.013089
5	10.585	0.0040506	2.379e-006	7.7548e-006
6	11.717	5.0483e-006	0.074796	0.0046922
7	12.653	8.9234e-005	0.0058317	0.016036
8	16.771	0.00019427	0.075717	0.22694
9	17.027	0.011649	3.3592e-005	0.0044589
10	20.373	0.01054	0.00049698	0.00032504
11	20.883	0.0014126	0.015117	0.0044589
12	21.17	0.31492	3.1686e-005	4.0534e-005
13	21.367	6.6197e-007	0.00041061	0.00025183
14	21.788	0.000634	0.0098931	0.0034084
15	23.844	1.575e-007	4.6063e-005	0.00068844
16	23.909	5.3815e-008	0.0018257	0.0001465
17	24.096	0.0055681	2.2385e-008	2.6586e-006
18	26.989	3.3711e-006	0.00046164	0.00054554
19	27.038	3.3898e-007	0.0056848	0.0015648
20	27.525	1.9237e-005	0.00022332	1.4266e-007

**Tableau 5 : Les participations massique  $\beta = 40^\circ$ .**

N° de Mode	Fréquence (Hz)	Direction X	Direction Y	Direction Z
1	7.9922	7.2376e-005	0.00062007	0.00038868
2	8.2183	1.7161e-006	0.05605	0.032163
3	9.1321	0.0016632	7.6857e-005	5.4395e-005
4	9.2255	1.5336e-006	0.038878	0.033312
5	11.081	0.0079847	0.00010812	2.2676e-005
6	11.868	1.0803e-006	0.061676	0.010459
7	14.533	4.9944e-007	0.011093	0.038934
8	16.964	1.8968e-009	0.12785	0.17585
9	17.941	0.016882	3.9658e-005	5.4259e-005
10	21.154	7.8954e-005	0.008962	0.0068483
11	21.348	0.01436	9.4606e-005	0.00013702
12	21.53	0.00067061	7.7016e-006	0.00082326
13	21.732	0.29767	5.8091e-006	4.9243e-006
14	22.024	0.00015251	0.0080855	0.0070861
15	24.056	3.3748e-006	0.0011351	5.4561e-005
16	24.148	2.7884e-005	0.00030866	0.00096231
17	24.547	0.0066335	4.0971e-006	8.408e-007
18	27.082	1.5215e-006	0.0018354	0.0036527
19	27.385	1.5227e-007	0.0011327	0.0008594
20	27.634	3.0048e-007	0.0013031	4.2639e-005

**Tableau 6 : Les participations massique  $\beta = 50^\circ$ .**

N° de Mode	Fréquence (Hz)	Direction X	Direction Y	Direction Z
1	7.8683	3.398e-006	0.0012894	0.0037402
2	8.1017	0.0001444	0.010807	0.0074985
3	8.3047	0.00048956	0.041168	0.069278
4	8.6461	0.00095111	0.013878	0.028602
5	10.777	0.0043131	2.2348e-005	4.5101e-006
6	11.88	2.3037e-005	0.055968	0.026451
7	12.728	6.0163e-005	0.00065051	0.018739
8	17.134	0.0047138	0.10439	0.064159
9	17.163	0.0057247	0.073545	0.06573
10	20.561	0.0067115	0.0002209	0.00065256
11	21.101	0.00057137	0.0089649	0.010433
12	21.568	6.049e-005	0.00031844	0.00022788
13	21.784	0.31002	4.1619e-005	6.8883e-005
14	21.95	0.010618	0.0050199	0.0069965
15	24.114	6.6909e-006	0.00018118	0.0003075
16	24.148	1.5744e-009	0.00097859	0.0010017
17	24.411	0.0069443	2.3323e-006	1.6258e-007
18	26.952	2.6704e-005	8.3163e-005	6.2029e-007
19	27.054	7.2869e-006	0.0029136	0.0042763
20	27.598	8.636e-006	0.0011082	6.1981e-006

## Annexe 6-2 : Les participations massiques de l'analyse dynamique forcée

*Tableau 1 : Les participations massique  $\beta = 0^\circ$  (à la neige).*

N° de Mode	Fréquence (Hz)	Direction X	Direction Y	Direction Z
1	7.7358	3.7872e-005	0.0086171	0.00019822
2	7.9805	4.4268e-005	0.091893	0.00039236
3	8.6458	1.6518e-006	0.096448	0.00084856
4	9.1185	0.0025838	0.0011994	0.00012433
5	10.914	0.0051508	9.9192e-009	1.3308e-005
6	11.758	3.6069e-005	0.055748	0.0039427
7	13.546	0.00019492	0.0099114	0.0069414
8	16.949	1.9277e-005	3.6709e-006	0.30592
9	20.593	0.31497	3.922e-006	1.6846e-005
10	22.101	0.029005	0.00012174	3.8648e-006
11	24.148	1.7539e-006	0.0072722	4.5737e-005
12	24.44	6.039e-005	0.012713	5.2558e-006
13	25.197	5.6587e-007	0.00032556	5.2463e-005
14	26.379	1.049e-005	0.055706	1.9718e-005
15	28.095	3.9072e-006	0.02346	3.1126e-006
16	30.563	5.3943e-007	0.00048715	0.00019658
17	30.762	2.1661e-005	0.0049737	2.6191e-005
18	34.045	7.2503e-006	2.8726e-006	0.0015959
19	34.322	2.1469e-005	7.5083e-007	7.4402e-005
20	35.922	0.00013319	0.00010222	7.2864e-005

*Tableau 2 : Les participations massique  $\beta = 10^\circ$ .*

N° de Mode	Fréquence (Hz)	Direction X	Direction Y	Direction Z
1	7.7554	2.1797e-005	0.015273	7.6404e-005
2	8.0131	9.0434e-005	0.071433	0.00072861
3	8.6405	3.5474e-005	0.10354	0.006634
4	9.0929	0.002314	0.0002665	0.00026039
5	11.009	0.0077125	7.0598e-005	1.2053e-005
6	11.716	6.3665e-005	0.05741	0.00051555
7	13.483	0.00019937	0.0099125	0.0085292
8	17.123	2.5343e-005	0.0095231	0.29768
9	21.056	0.28094	0.0001138	2.8013e-005
10	22.144	0.055264	0.001553	0.00012255
11	22.923	0.0015843	0.00063058	4.6373e-005
12	23.534	0.0032134	0.0031349	4.968e-005
13	24.905	8.9144e-005	0.0053361	0.00052595
14	26.24	2.5346e-005	0.04865	0.0015931
15	26.366	1.5437e-005	0.012344	0.00096529
16	28.296	8.5584e-006	0.025909	0.00083218
17	30.381	9.5708e-006	0.0024857	0.00030934
18	31.58	7.3193e-007	3.0159e-005	0.00017907
19	32.42	1.6477e-005	0.00044472	0.0035753
20	33.286	0.00028891	0.00055014	7.0243e-005

**Tableau 3 : Les participations massique  $\beta = 20^\circ$ .**

N° de Mode	Fréquence (Hz)	Direction X	Direction Y	Direction Z
1	7.8756	3.0619e-005	0.013836	0.0010241
2	8.0275	6.878e-005	0.080197	0.0064415
3	8.7287	7.6473e-005	0.078176	0.016351
4	9.2032	0.0025685	2.0663e-005	0.00033812
5	10.911	0.005323	9.2694e-005	9.1529e-007
6	11.948	5.5181e-005	0.060688	0.000422
7	13.829	0.00019929	0.0056409	0.012688
8	17.099	2.7801e-005	0.035861	0.27014
9	20.753	0.32629	5.5289e-007	1.776e-005
10	22.474	0.01707	2.0187e-005	1.7432e-007
11	23.179	0.00047465	0.0023744	0.0008096
12	24.268	5.6337e-005	0.0020395	3.4468e-005
13	25.955	2.4149e-007	0.049595	0.0074469
14	26.903	3.1903e-006	7.9092e-006	0.00012544
15	27.669	2.1548e-005	0.0038171	0.00055924
16	28.108	3.5137e-007	0.03148	0.0052606
17	30.65	4.2701e-008	0.0032916	7.6749e-006
18	32.641	8.8117e-009	1.5713e-007	4.6947e-005
19	33.255	3.3285e-008	1.2597e-006	0.00070001
20	33.305	9.1441e-007	0.00021725	0.0047402

**Tableau 4 : Les participations massique  $\beta = 30^\circ$ .**

N° de Mode	Fréquence (Hz)	Direction X	Direction Y	Direction Z
1	7.8518	2.7407e-005	0.0020816	0.00032018
2	8.0366	2.8226e-005	0.082062	0.019314
3	8.6941	1.8348e-005	0.061911	0.031546
4	9.0847	0.0028479	0.00036625	2.3062e-005
5	10.839	0.005479	7.2612e-005	7.6605e-006
6	11.938	1.8321e-005	0.058801	0.0050011
7	13.784	0.00023252	0.0010877	0.01432
8	17.125	2.4958e-005	0.077562	0.22805
9	20.689	0.27856	1.0239e-005	0.00010439
10	21.988	0.064029	0.00014921	0.00021558
11	25.071	1.1535e-005	0.0057177	0.0021207
12	25.791	6.8803e-008	0.026518	0.0090404
13	26.144	2.8756e-005	0.022667	0.010195
14	27.844	0.00022155	0.0015597	0.00051037
15	28.455	3.6364e-005	0.015014	0.0054097
16	30.076	1.0362e-005	0.0039796	0.0021727
17	31.493	2.2871e-006	0.002066	0.00036223
18	33.05	1.1535e-005	1.2424e-005	6.3795e-005
19	33.695	3.2667e-005	0.00016251	3.2738e-006
20	35.471	2.1305e-005	9.5913e-005	5.8995e-007

**Tableau 5 : Les participations massique  $\beta = 40^\circ$ .**

N° de Mode	Fréquence (Hz)	Direction X	Direction Y	Direction Z
1	7.7935	8.4687e-005	0.00096903	0.00011195
2	8.0866	9.1842e-008	0.073728	0.038234
3	8.6003	5.3284e-005	0.040815	0.044577
4	9.1306	0.0024464	0.00087888	0.0011277
5	11.096	0.0082197	3.3186e-007	1.4346e-005
6	11.996	4.7131e-006	0.050221	0.014401
7	13.881	3.2966e-005	0.00081528	0.014125
8	17.052	2.132e-007	0.12598	0.17619
9	20.909	0.18012	1.4539e-005	1.6522e-005
10	22.016	0.16026	3.3741e-005	5.6283e-006
11	24.848	2.3982e-006	0.0055192	0.0038523
12	25.7	6.0144e-005	0.018679	0.013527
13	26.057	5.8988e-006	0.018682	0.017601
14	28.649	8.2648e-006	0.012519	0.0094875
15	29.282	9.3258e-005	0.0031785	0.0019636
16	30.437	2.4597e-005	0.0008409	0.00026364
17	31.532	0.0001365	0.00029699	0.00064327
18	32.35	0.00022301	0.00017271	8.7711e-005
19	35.496	7.7871e-005	2.2347e-006	3.4606e-006
20	36.394	2.868e-006	7.0399e-005	0.00011578

**Tableau 6 : Les participations massique  $\beta = 50^\circ$ .**

N° de Mode	Fréquence (Hz)	Direction X	Direction Y	Direction Z
1	7.9095	6.4091e-005	0.0022825	0.0017995
2	8.1863	1.1135e-006	0.063084	0.069593
3	8.746	1.7857e-005	0.017574	0.045497
4	9.2935	0.0027139	8.7317e-005	0.00037607
5	11.107	0.0058705	8.1679e-006	2.8139e-006
6	12.259	7.8756e-007	0.0391	0.027026
7	14.777	4.4574e-008	0.0080603	0.014106
8	17.17	1.3143e-008	0.17257	0.121
9	21.129	0.3146	6.5821e-006	1.813e-005
10	22.634	0.029285	2.4699e-005	9.1028e-005
11	25.403	7.0758e-008	0.0030074	0.004827
12	26.225	5.8988e-006	0.029831	0.046333
13	26.679	1.7411e-005	0.00039865	0.0015164
14	28.79	7.2683e-007	0.0077563	0.01161
15	32.296	1.1812e-006	4.66e-005	1.6071e-005
16	32.428	1.7692e-008	0.00074013	0.0013676
17	32.829	0.00011495	0.00011402	0.00024803
18	35.104	2.3519e-007	2.4551e-006	1.3007e-006
19	36.548	2.5301e-006	0.00012552	0.00014601
20	38.15	0.00012433	0.00011066	2.8321e-005



تجميع الطاقة من الأشعة الشمسية باستخدام الأجهزة الكهروضوئية يمكن أن يتم بعدة طرق: حسب توجيه أفقي ثابت، على مستوى مائل حسب خط عرض الموقع، على مستوى مائل بزاوية التقاط متلى أو حسب توجيه ناظمي للأشعة. لهذا، فإن أجهزة تعقب الأشعة الشمسية بمحورين هي بديل واعد وتستخدم بشكل متزايد في الصناعة الحديثة لتحسين كمية الطاقة المولدة من الأجهزة الكهروضوئية. لذلك، فإن تصميم هذه الأجهزة يجب أن يعطي اهتماما خاصا لفعل الرياح والتلوج كأحمال إثارة غير مرغوب فيها من أجل استقرار وموثوقية الهيكل. إن استغلال البرمجيات الرقمية الصناعية بكثافة في التمثيل الهندسي لأجهزة تعقب الأشعة الشمسية (متتبعات الشمس) والمحاكاة ثلاثية الأبعاد باستعمال طريقة العناصر المنتهية لخواصها الساتيكية والديناميكية أتاحت لنا الفهم الجيد، تحديد و تحسين الأداء الميكانيكي و الاهتزازي بصفة متلى من ناحية المقاومة والصلابة.

لقد ركزت هذه الدراسة على هدفين رئيسيين:

الهدف الأول هو تصميم النموذج الجديد لجهاز تعقب الأشعة الشمسية ذو محورين (السمت وارتفاع الشمس) باستخدام البرنامج الصناعي SOLIDWORKS. الإضافة العلمية والتقنية الجديدة في هذا التصميم هو استخدام وحدة مركزية هيدروليكية لحركة الرفع لأربعة متتبعات شمسية في وقت واحد وكذلك النمذجة الهندسية لهيكل جهاز تعقب الطاقة الشمسية ذو محورين من نوع MS-2 TRACKER10+ (بمقياس كبير 90م<sup>2</sup>).

الهدف الثاني هو معالجة ثبات و موثوقية أجهزة التتبع المدروسة من الناحية الميكانيكية و الاهتزازية، باستعمال المحاكات والتحليل الساتيك والديناميكي ثلاثي الأبعاد باستعمال طريقة العناصر المنتهية باستعمال SOLIDWORKS/Simulation تحت تأثير شروط الحدية من أحمال حرجة و روابط أثناء مختلف الوضعيات العملية، وكذا التحليل الحر و الديناميكي للجهاز الجديد من أجل تثبيت و تثمين مميزات الديناميكية.

من أجل هذا، فإن تحليل الجهازين NSS2 و MS-2 في مختلف وضعيات التشغيل يبين أن هذين الأخيرين مستقران و لديهما موثوقية لأن الخواص الميكانيكية للمقاومة و الصلابة مقبولة ومؤشرات الأداء الديناميكي هي ضمن المعايير المنصوص عليها في ديناميكا الهياكل.

وأخيرا، فإن عمل هذه الأطروحة الذي اعتمد على التحليل الساتيك والديناميكي لجهاز تعقب الأشعة الشمسية NSS2 و MS-2 باستعمال طريقة العناصر المنتهية ثلاثية الأبعاد يمكن أن يكون عونا كبيرا ليس فقط لتصميم متتبعات الشمس على نطاق واسع ولكن أيضا يمكن أن يكون أداة تكنولوجية هامة (إنتاج صناعي) لتصميم الهياكل الميكانيكية والديناميكية بشكل عام.

## RÉSUMÉ

La collecte énergétique du rayonnement solaire par des systèmes photovoltaïques peut s'effectuer de plusieurs manières : selon une orientation horizontale fixe, sur un plan incliné à la latitude du lieu, sur un plan optimal ou selon une orientation normale. Cependant les systèmes de suiveur solaire à deux axes constituent une alternative prometteuse et sont de plus en plus utilisés dans l'industrie moderne afin d'améliorer la quantité de la puissance produite par les systèmes photovoltaïques. Néanmoins, la conception de ces dispositifs doit donner une attention particulière à l'action du vent et de la neige comme des charges perturbatrices indésirables pour la stabilité et la fiabilité de la structure. L'exploitation des logiciels numériques industriels à outrance pour la modélisation géométrique des suiveurs solaires (Trackers) et la simulation 3D par éléments finis de leurs comportements statiques et dynamique permettent de mieux comprendre, optimiser et améliorer les performances mécaniques et vibratoires à la résistance et à la rigidité.

Deux objectifs principaux ont été visés dans cette recherche.

Le premier objectif est la conception d'un nouveau prototype du système de suiveur solaire à deux axes (azimut et l'élévation) sous le logiciel industriel SOLIDWORKS. L'innovation de la présente conception est l'utilisation d'une centrale hydraulique pour le mouvement d'élévation pour quatre suiveurs solaires développés et aussi la modélisation géométrique de la structure du système de suiveur solaire à deux axes de type MS-2 TRACKER10+ (à grande échelle 90 m<sup>2</sup>) est présentée.

Le deuxième objectif porte sur le traitement de la stabilité et de la fiabilité des deux suiveurs du point de vue mécanique et vibratoire. On a présenté la conception statique 3D par éléments finis sous SOLIDWORKS/Simulation des deux systèmes de suiveurs solaires soumis aux conditions aux limites de chargements critiques (vent et neige) et des liaisons pour différentes positions (postures) opératoires, ainsi que l'analyse modale et dynamique du nouveau système afin de fixer et apprécier ses qualités dynamiques.

Toutefois, l'analyse des deux suiveurs NSS2 et MS-2 pour les différentes positions de fonctionnement montrent que les systèmes sont stables et fiables car les propriétés mécaniques de résistance et de rigidité sont acceptables et les indices de performance dynamiques sont dans les normes prescrites par la réglementation des dynamiques des structures.

Finalement, les travaux de cette thèse basés sur l'analyse statique et dynamique des deux suiveurs NSS2 et MS-2 par éléments finis 3D peut être d'une grande aide non seulement pour la conception des suiveurs solaires à grandes échelles mais aussi peut constituer un outil technologique majeur (produit industriel) pour le design des structures mécaniques dynamiques en général.

## ABSTRACT

Energy collection of solar radiation by photovoltaic systems can be done in several ways: according to a fixed horizontal orientation, on an inclined plane to the latitude site, on an optimal plane or on a normal orientation to the sunlight. Therefore, the two axes solar tracker systems are promising alternative and are increasingly used in modern industry to improve the amount of power generated by photovoltaic systems. Hence, the design of these devices must give a special attention to the wind and snow loads as undesirable disturbance to the stability and reliability of the structure. The intensive exploitation of industrial digital software for geometric modeling of solar trackers and 3D finite element simulation of their static and dynamic behaviors provide well understanding, optimize and improve the vibratory and mechanic performance to resistance and rigidity.

This work focused on two main objectives.

The first objective is to design a new prototype of solar tracker system with two axes (azimuth and elevation) based on SOLIDWORKS Simulation with local means available on the national market and equipped with simple orientation mechanisms. The innovation of this design is the use of a hydraulic unit for the elevation movement of four solar trackers developed and also the geometric modeling of the solar tracking structure with two axes of MS-2 TRACKER10 + type ( great scale 90 m<sup>2</sup>).

The second objective is the treatment of the stability and reliability of the trackers as a mechanic and vibratory point of view. Initially, we presented the static and dynamic design based on 3D finite elements using SOLIDWORKS/Simulation of both solar tracking systems subjected to the boundary conditions of critical loads (wind and snow) and joints in different operating positions (postures) and the modal and dynamic analysis of the new system to fix and appreciate their dynamic qualities.

Therefore, the analyses of the two NSS2 and MS-2 Trackers for different operating positions show that the systems are stable and reliable because the mechanical properties of resistance and reliability are acceptable and the dynamic performance indices are within the standards prescribed by the regulations of dynamic structures.

Finally, the work of this thesis based on the static and dynamic analysis of the two Trackers NSS2 and MS2 with 3D finite element can be of a great help not only for the design of large scale trackers but also can be a major technological tool (industrial product) for the design of dynamic mechanical structures in general.