

Développement d'une structure agrivoltaïque innovante : la canopée agricole avec Ansys



Josselin GUEDON

08 juin 2023



**SIMULATION
CONFERENCE**

Sommaire

- Présentation du Groupe TSE, le projet « canopée agrivoltaïque » et ses motivations
- Dimensionnement de la structure mobile
- Modèle à câbles
- Analyse modale expérimentale et opérationnelle
- Etudes aérodynamiques
- Prémices d'interaction fluide structure (IFS)

Présentation du Groupe TSE



Cofondé en 2012 par ALTUS ENERGY et SOLAIS, pionniers du secteur photovoltaïque depuis 2008.
Basé à Sophia-Antipolis.



254 collaborateurs répartis sur le territoire français



600M€ investis



27M€ de CA annuel



2 GW en cours de développement en France
OBJECTIF 5 GW D'ICI 2025



460 MW développés et construits en France, dont 210 MW en propre.



La canopée agricole d'Amance: Le 1^{er} site agrivoltaïque de TSE



- Promesse de bail signée avril 2020
- Dépôt de permis de construire Fin 2020
- Démarrage de la construction Oct 2021
- Fin construction Juin 2022



3 Ha d'ombrière
agrivoltaïque et 2
Ha de zone témoin



15 M€ (y compris
R&D) investis pour
TSE



2,4 Mwc
puissance
installée



5500 panneaux
bifaciaux, sur
trackers



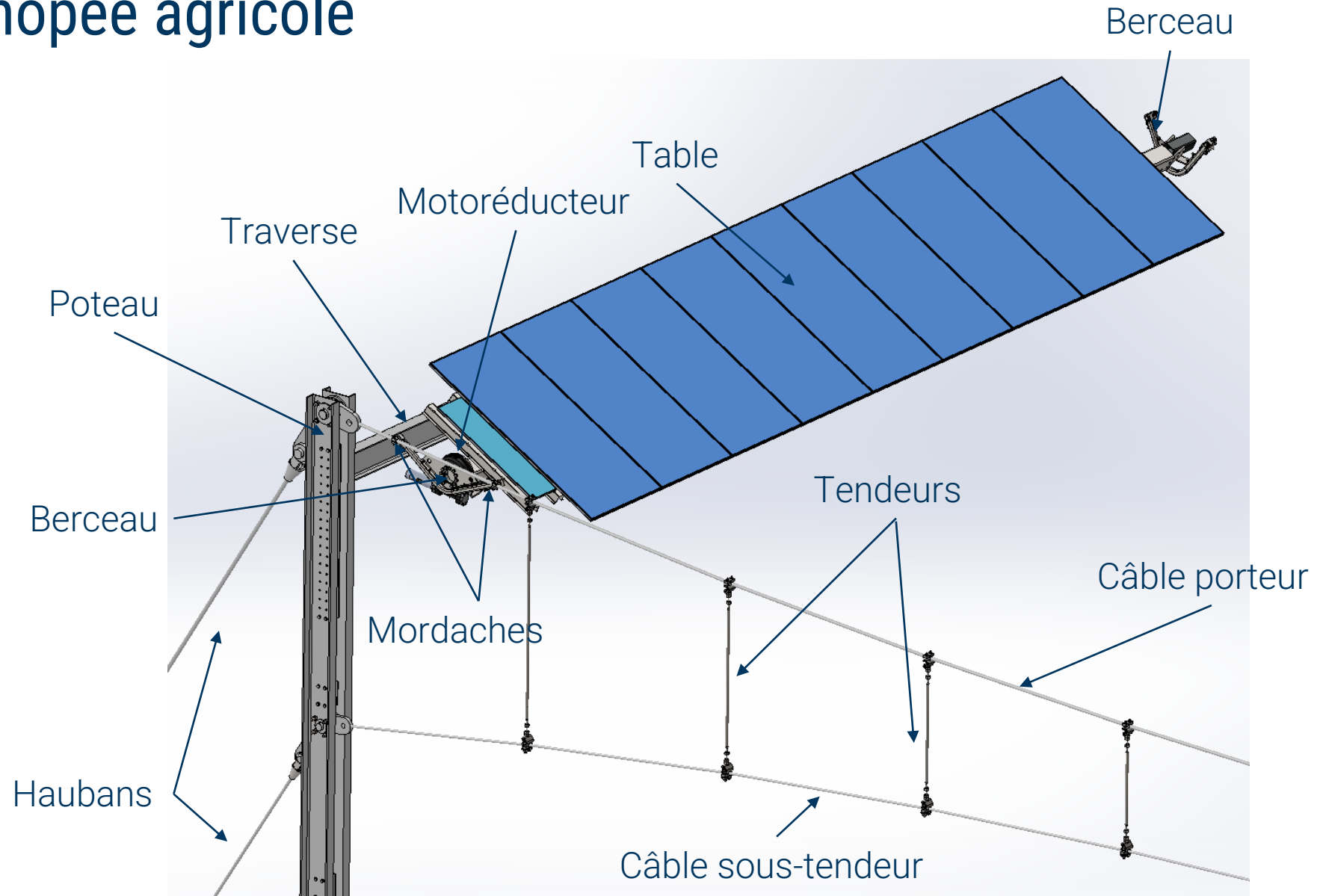
Un programme de
recherche
agronomique sur 9
ans



Exploitation de
grandes cultures



La canopée agricole



Dimensionnement de la structure mobile

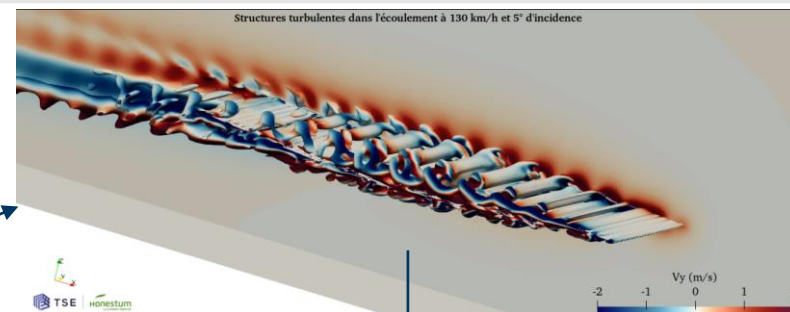
Quels efforts de vent considérer ?

Application des efforts de vent

$$F_{\text{vent}} = q_p \cdot C_f \cdot S_{\text{panneaux}}$$

Eurocode 1991-1-4

Soufflerie numérique



IFS couplage faible : champ de pression sur panneau

Soufflerie

Pression locale



Capteurs de pression
Sondes de Pitot
Jauges de déformation

Mesures sur pilote

Dimensionnement de la structure mobile

Quel sont les cas de chargement à prendre en compte ?

- Vent longitudinal max
- Vent longitudinal d'exploitation
- Vent latéral max

- Position de sécurité au-delà de la vitesse de vent longitudinal d'exploitation
- Pression dynamique de pointe correspondant à un vent max liée au lieu et à la rugosité de la parcelle
- Plage angulaire de rotation des tables

Autres cas de chargement ?

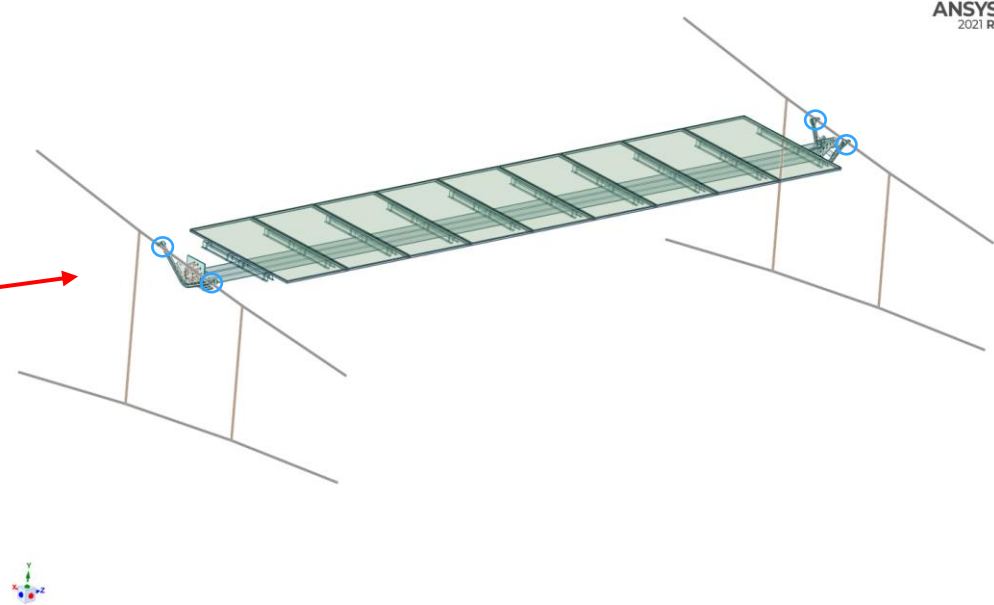
- Accélération (gravité terrestre pondérée)
- Cas de neige

➡ Cas Eurocode – combinaison linéaire de tous les cas « unitaires »

Dimensionnement de la structure mobile

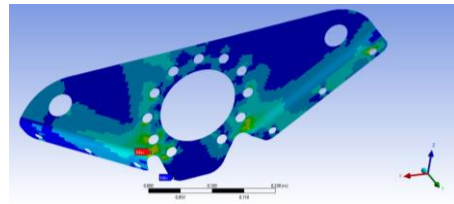
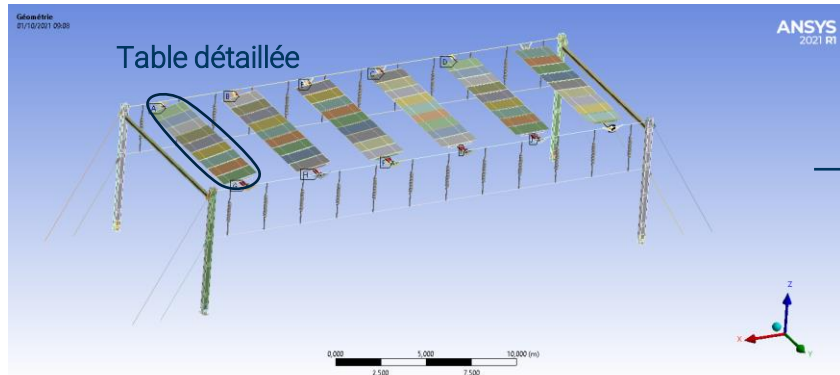
Pourquoi chercher à idéaliser les conditions aux limites au plus juste ?

- Modèle détaillé difficile à mettre en œuvre dans un modèle global à câbles
 - Prise en compte des pré-tensions de vis, contact, non-linéarité matériaux,...
 - Instabilité de l'élément câble par nature : élément devant être prétendu pour lui donner sa rigidité transverse
 - Temps de calcul
 - Nombre de cas de chargement à considérer
- Berceaux directement liés aux câbles : impact important des conditions aux limites trop contraignantes

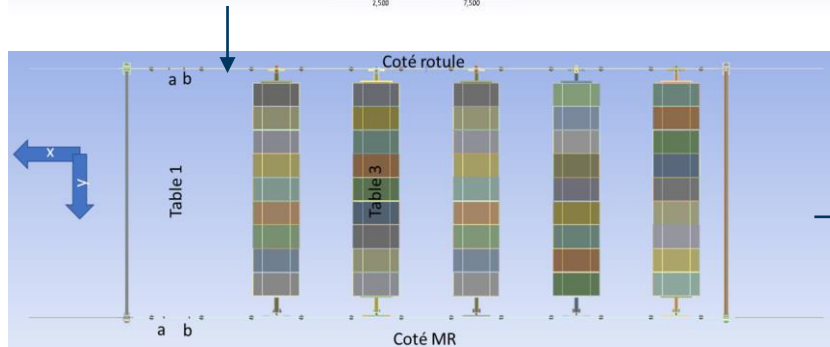
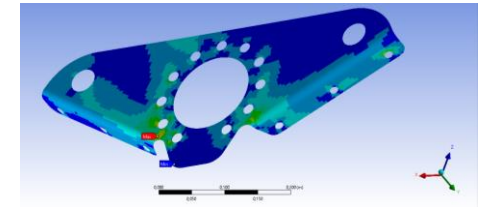


Dimensionnement de la structure mobile

Isolation d'une table seule sur un modèle réduit à câbles d'une portée



Corrélation non-parfaite mais jugée suffisante

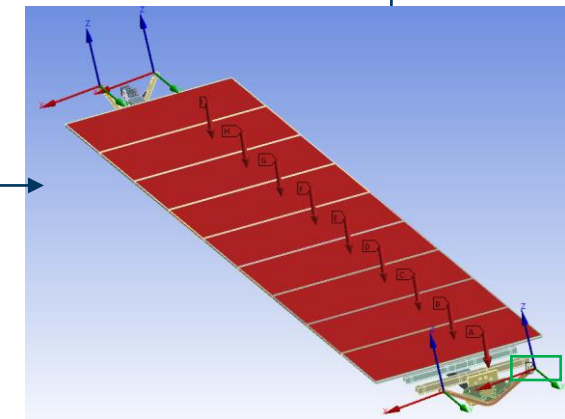


$$K = F \cdot X^{-1}$$

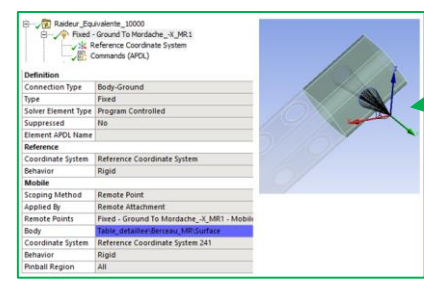
Matrix27

For KEYOPT(2) = 2, the unsymmetric matrix has the form:

C1	C2	C3	.	.	.	.	.	.	.	.	C12
C13	C14	C15	.	.	.	.	.	.	.	.	C24
C25	C26	C27	.	.	.	.	.	.	.	.	C36
.
.
.
.
.
.
.
C133	C134	C135	.	.	.	.	.	.	.	.	C144

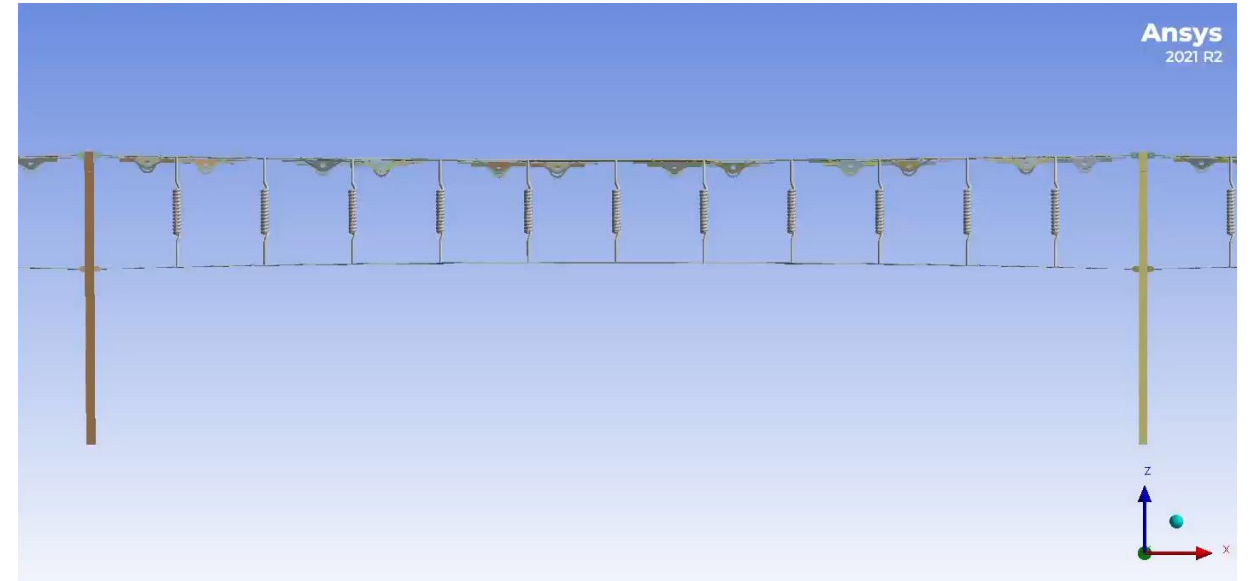
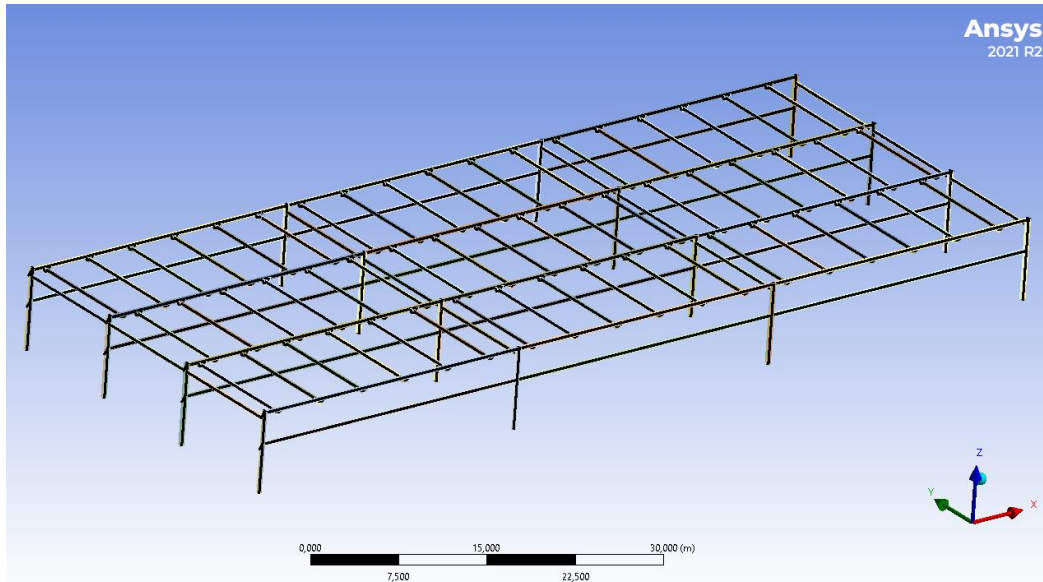


- 4 Cas de chargement analysés pour déduire les coefficients de raideur de la matrice de rigidité :
 $F_{(x,y,z)} = -10000 \text{ N} / -1000 \text{ N} / 1000 \text{ N} / 10000 \text{ N}$
- Application des efforts successifs au niveau des liaisons des mordaches « a » et « b »
- Utilisation de l'élément Matrix27 à la place des liaisons mordaches sur câbles avec un cas de chargement réel de vent



Modèle à câbles

Approche globale avec un modèle à câbles



- 3 lignes de 18 tables
- Pas de supposition a priori de la géométrie déformée
- Equilibrage préliminaire des lignes de câbles réalisable sur une seule ligne de câbles avec masses rapportées en lieu et place des tables
- Panneaux non représentés, masse équivalente distribuée

Modèle à câbles

Semi-automatisation

- Extraction des efforts aux liaisons d'intérêts semi-automatisée :
 - ➔ Identification des IDs de liaisons dans le fichier ds.dat puis utilisation d'une routine Python pour extraire les efforts et les stocker dans un fichier .csv pour post-traitement

Definition	
Connection Type	Body-Body
Type	General
Primitive Type	None
Translation X	Fixed
Translation Y	Fixed
Translation Z	Fixed
Rotations	Free Y
Element APDL Name	mr_l1_a_1
Suppressed	No
Reference	
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Remote Attachment
Scope	1 Edge
Body	Surface1
Coordinate System	Reference Coordinate System 3177
Behavior	Rigid
Pinball Region	All
Mobile	
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Remote Attachment
Scope	1 Vertex
Body	Beam (poutre_180)
Initial Position	Unchanged
Pinball Region	All

```
/com, ***** Create Joint "mr_l1_a_1" *****  
/com, Real Constant Set For Above Joint IS 19492  
! Joint Element Type Declaration and Definition using MPC184  
*set,_jid,19492  
et,_jid,184  
keyo,_jid,1,16 ! General Joint  
sectype,_jid, joint, gene, _wbjoint  
secjoint,,2863,2863  
secjoint,rdof,1,2,3,4,6  
mat,_jid  
real,_jid  
type,_jid  
secnum,_jid  
en,691040,2130841,2130842 ! body to body joint  
MR_L1_A_1 = 691040 ! Set Joint Element ID to User Specified Name
```

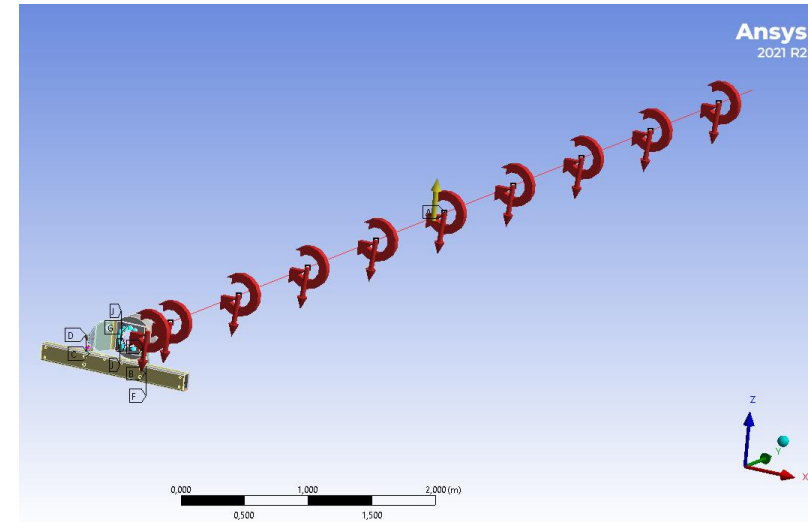
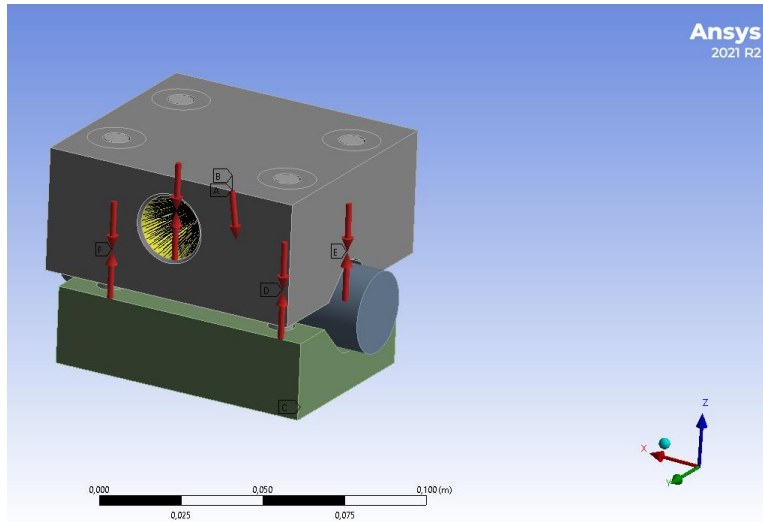
```
1 import csv  
2  
3 analysis = Model.Analyses[0]  
4  
5 step_number = int(27)  
6  
7 reader = analysis.GetResultsData()  
8 reader.CurrentResultSet = step_number  
9  
10 jlu = reader.GetResult("JU")  
11 jlr = reader.GetResult("JR")  
12  
13 jll = {}  
14  
15 for jid in [691040]:  
16     jll[jid] = {"Disp": jlu.GetElementValues(jid), "Rotat": jlr.GetElementValues(jid)}  
17  
18  
19 fpath=analysis.WorkingDir+'Nom_de_fichier.csv'  
20 with open(fpath, mode='wb') as rfile:  
21     wr = csv.writer(rfile, delimiter=';')  
22     wr.writerow(['step_number', 'substep_number', 'Joint Name', 'Joint ID', 'JUX [m]', 'JUY [m]', 'JUZ [m]', 'JRX [°]', 'JRY [°]', 'JRZ [°]'])  
23     for jl in jll:  
24         wr.writerow(['step_number', jl,  
25                     jll[jl]["Disp"][0],  
26                     jll[jl]["Disp"][1],  
27                     jll[jl]["Disp"][2],  
28                     jll[jl]["Rotat"][0],  
29                     jll[jl]["Rotat"][1],  
30                     jll[jl]["Rotat"][2]])
```

- Utilisation des efforts pour le dimensionnement des berceaux, mordaches et axes des mordaches dans des modèles détaillés
- Utilisation des efforts pour le dimensionnement des composants du commerces (Motoréducteur, Rotule,...)

Modèles détaillés

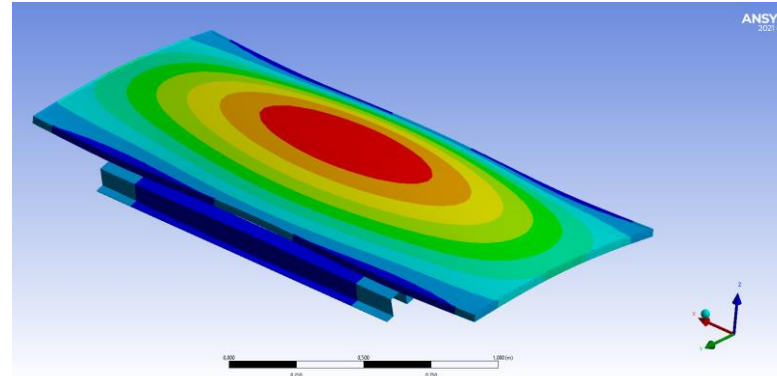
Détail des liaisons, des composants

- Utilisation des différentes techniques de modélisation des composants suivant le besoin de détails (1D, 2D, 3D...)
- Interface 2D/3D pour optimisation du nombre d'éléments loin des zones d'intérêt
- Détail des liaisons boulonnées (pré-tension, contacts frictionnels, non-linéarité matériaux)

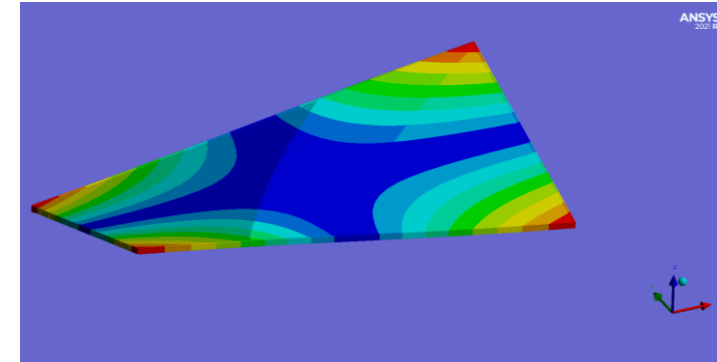
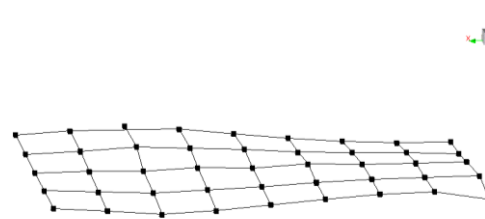


Analyse modale expérimentale sur panneau et test statique

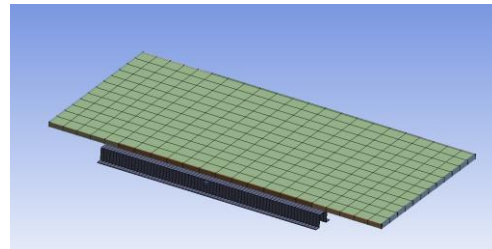
- Test statique IEC 61215



- AME panneau en libre et en « encastrée »

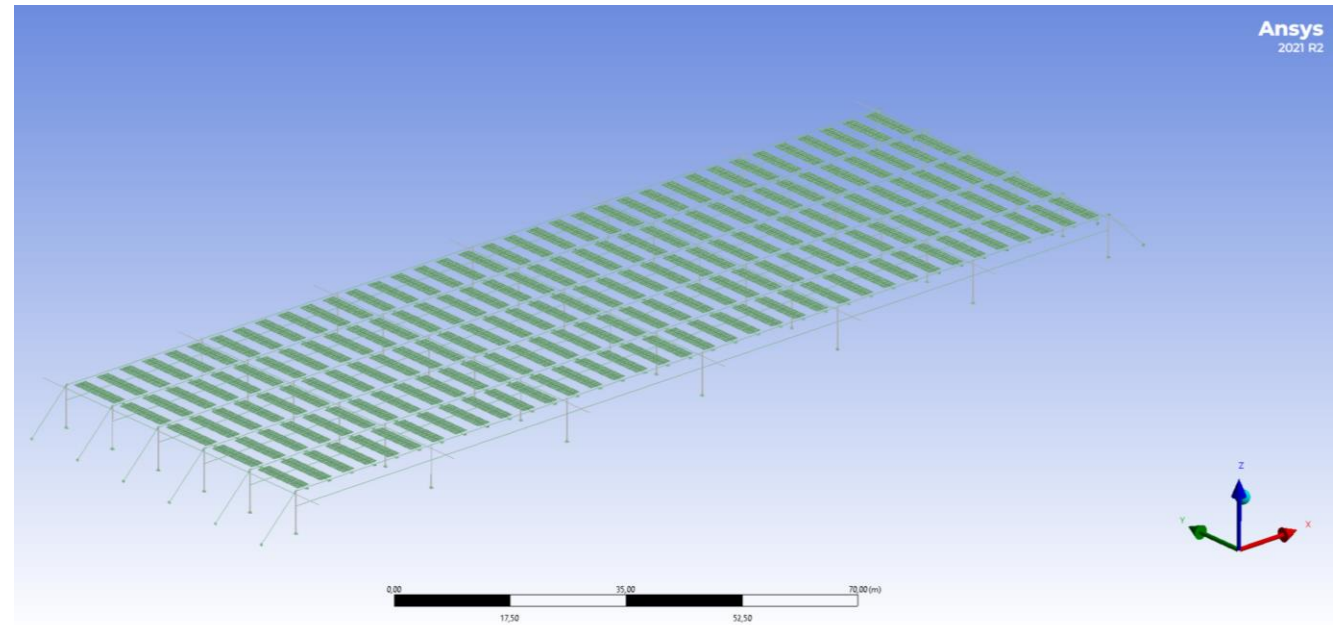


- Modèle avec 500 éléments (ordre 2) avec un écart modèle/réalité inférieur à 10 % en statique et en modal jusqu'à 40 Hz



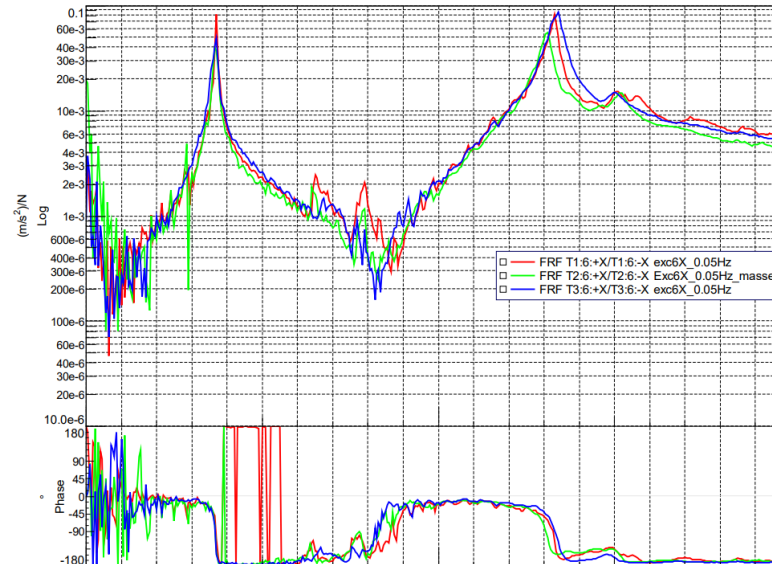
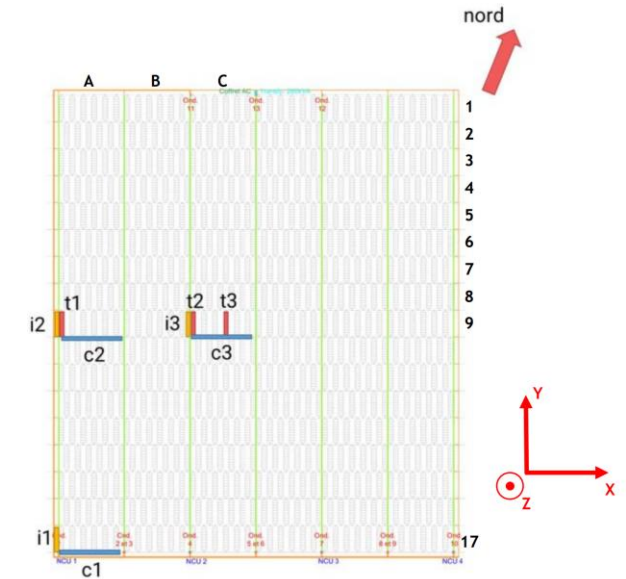
Modèle grande échelle (environ 30% d'une centrale)

- Version H2 (en construction)
- 5 lignes de 36 tables soit 1440 panneaux (soit 820 KW)
- Prise en compte des câbles (CABLE 280)
- Modèle filaire et surfacique
- Environ 2M d'éléments
- Prise en compte réelle des pentes en fonction des relevés géométriques
- Rotation des panneaux
- Extraction des efforts aux liaisons
- Prise en compte de la thermique (variation de tension journalière et annuelle)



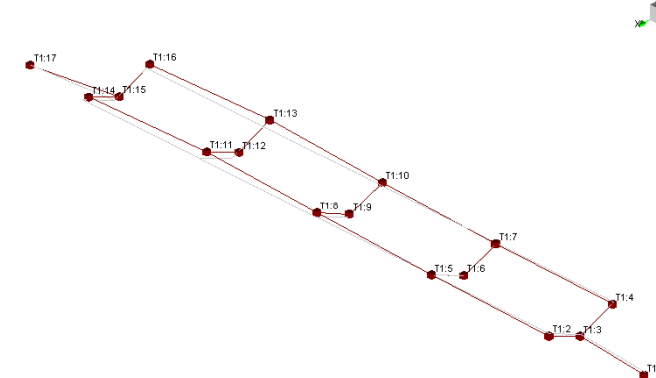
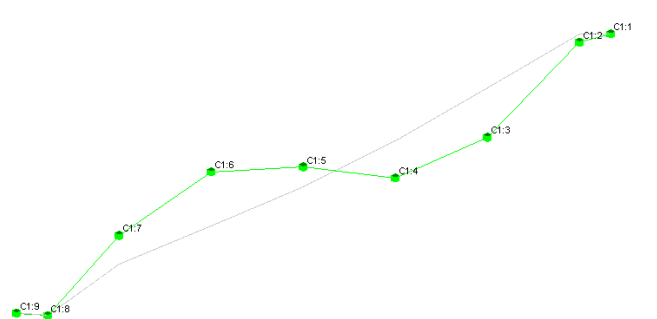
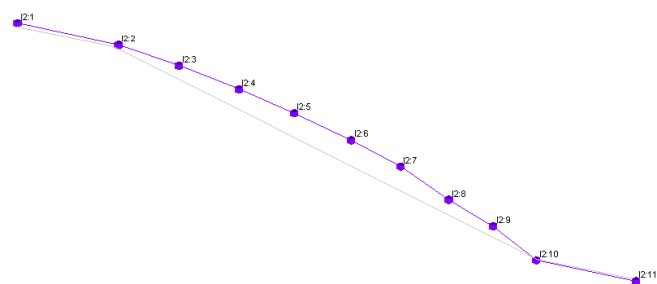
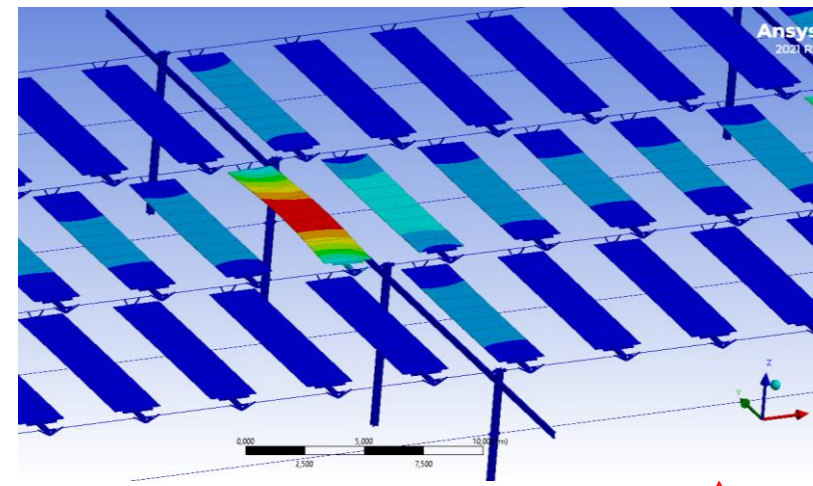
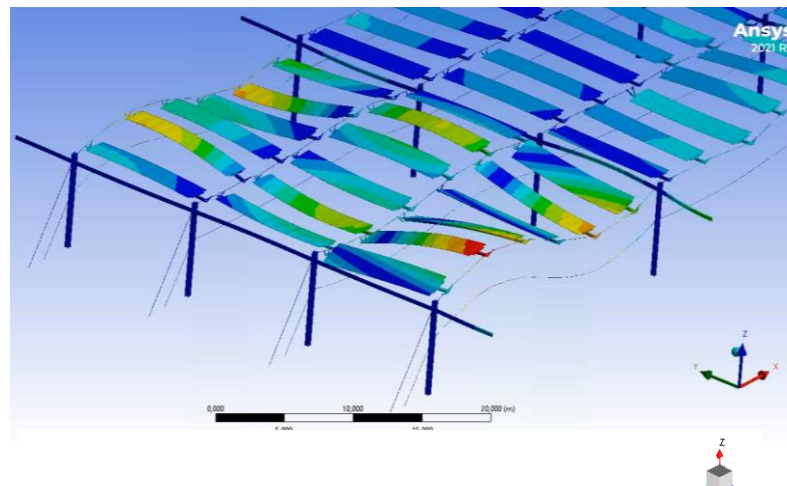
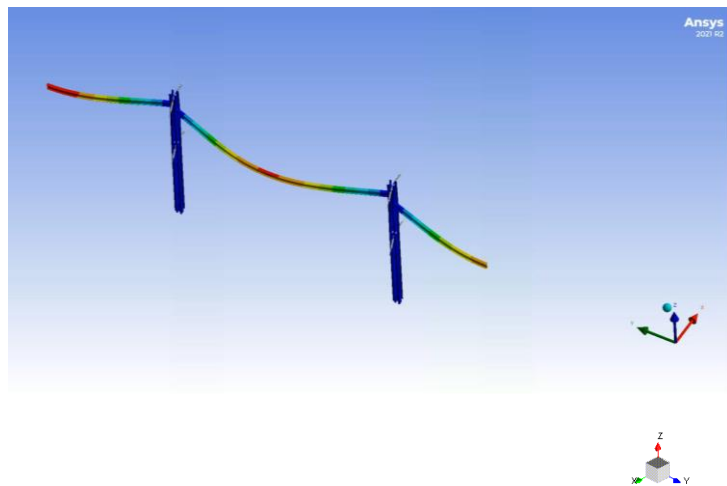
Analyse modale en conditions opérationnelles

- Version H1
- 1 semaine de mesures sur site
- Mesures des fréquences propres, déformées modales et amortissements modaux sur :
 - 3 tables
 - 3 lignes de câbles
 - 3 traverses



Confrontation

- Réalité vs modèle Ansys 3 lignes de 36 tables sans pente
- Prise en compte des panneaux recalés
- Pas de recalage en masse ou en raideur



Moins de 10% d'écart sur les premiers modes

Etudes aérodynamiques

- Eurocode 1991-1-4 ne comprend pas de référence proche de la canopée agrivoltaïque :
 - Toitures multiples isolées ?
 - ➔ pas de détachement tourbillonnaire au BA et au BF.
 - Toiture isolée à un seul versant :
 - ➔ Pas de prise compte des effets dus aux sillages

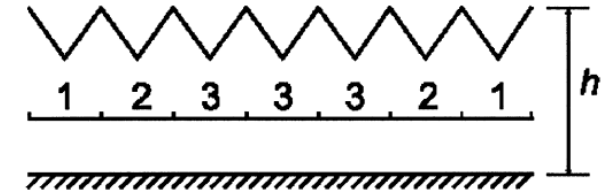
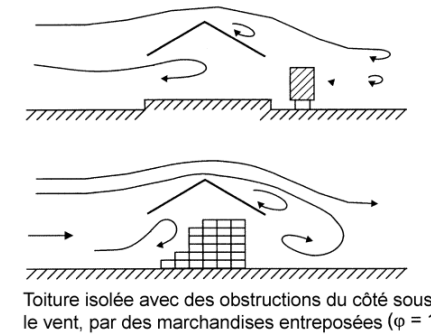
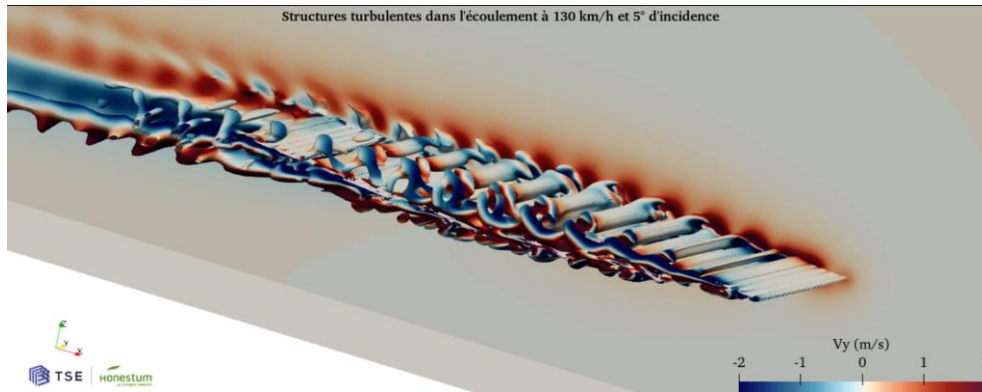
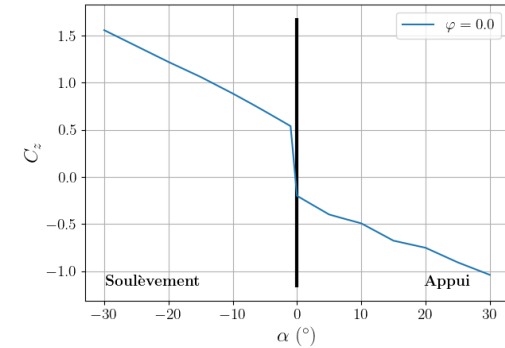


Figure 7.18 — Toitures multiples isolées
Eurocodes 1991-1-4



Toiture isolée avec des obstructions du côté sous le vent, par des marchandises entreposées ($\varphi = 1$)

Eurocodes 1991-1-4



- Ajout d'éléments structuraux (IPE, IPN, ...) entraînant de fortes perturbations de l'écoulement amont :
 - ➔ comment les prendre en compte ?

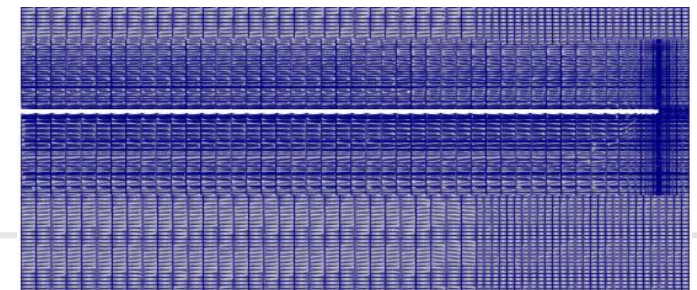
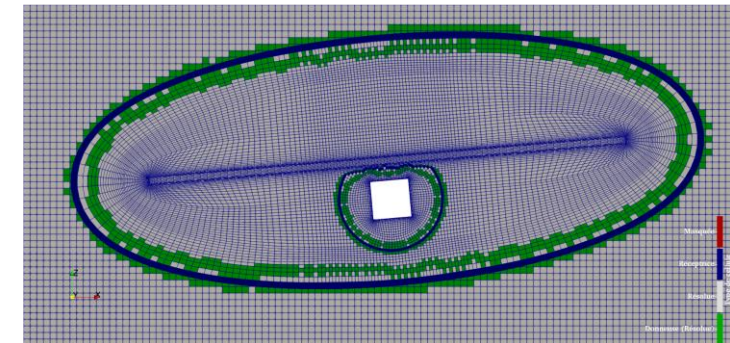
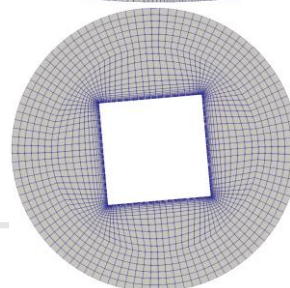
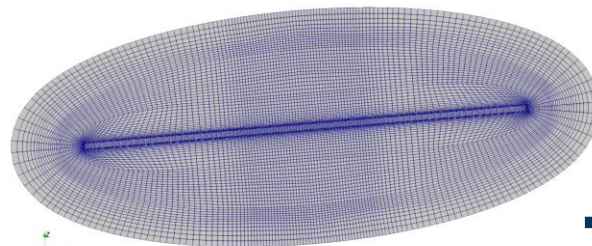
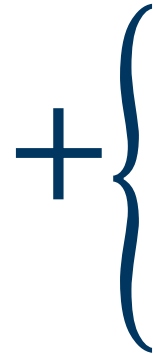
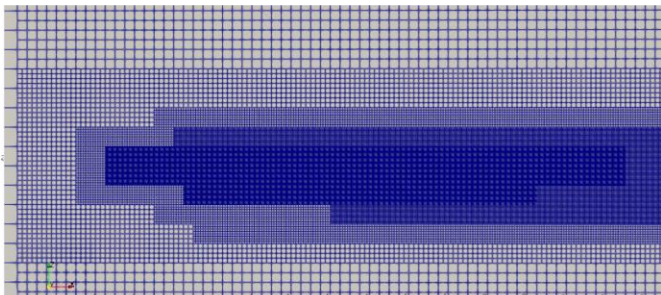
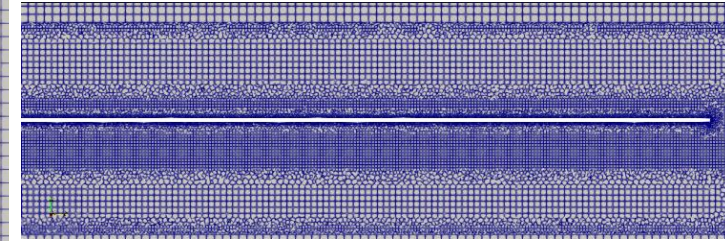
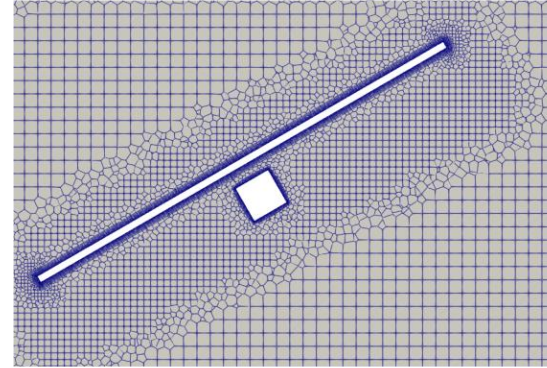


- Pour un meilleur dimensionnement de la canopée agrivoltaïque, il reste donc 2 possibilités :
 - Les essais en soufflerie : long à mettre en place, très coûteux,
 - La simulation numérique : ➔ Utilisation de Fluent



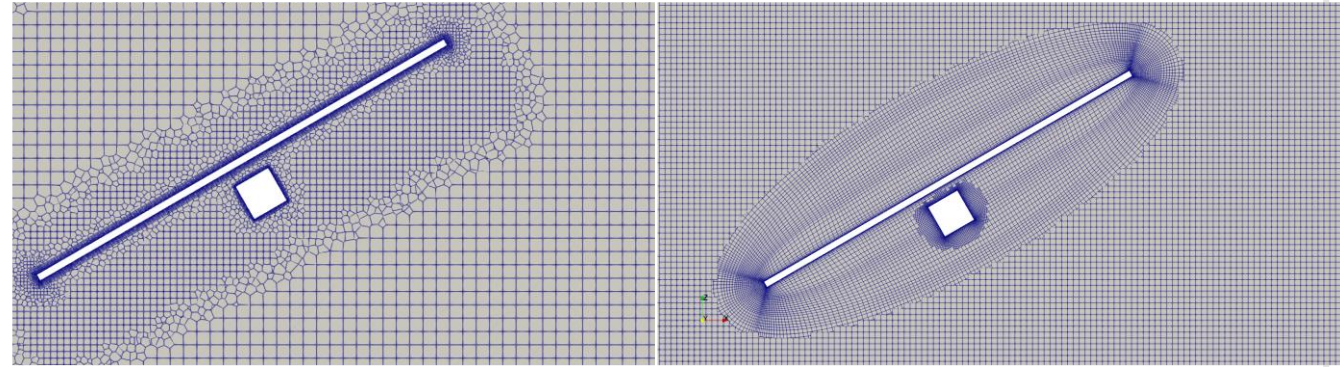
Etudes aérodynamiques

- Spécificités :
 - Il n'y a que des angles droits (tables, poutres, traverses),
 - Epaisseur relative de la table très faible ($e/c < 1,5\%$) avec une épaisseur physique de l'ordre de 30 mm,
 - $Re_c \in [1.5 \cdot 10^6, 5.5 \cdot 10^6]$
- Maillage :
 - **Fluent Meshing** n'est pas adapté :
 - Le raffinement requis au niveau des BA et BF est inférieur au cm suivant x et z ,
 - Méthode Hexcore est isotrope et conduit à des maillages trop volumineux sur la configuration de référence (6 tables + poutres),
 - Solution retenue :
 - Méthode chimère \rightarrow très flexible pour varier les incidences et les positions relatives,
 - Utilisation d'**ICEM-CFD** (maillages structurés multiblocs) : permet un contrôle très précis du raffinement,
 - Inconvénients : coût de l'interpolation au niveau des interfaces

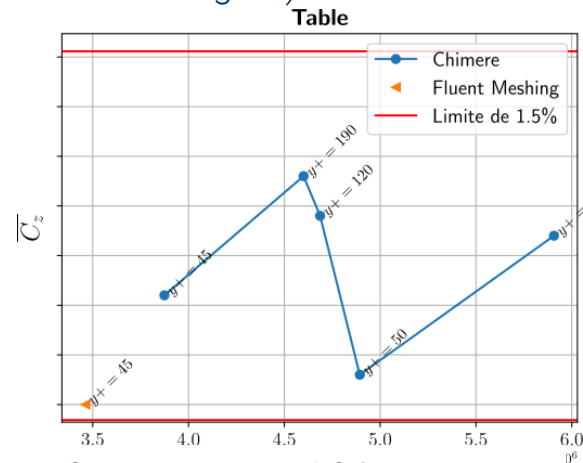


Etudes aérodynamiques

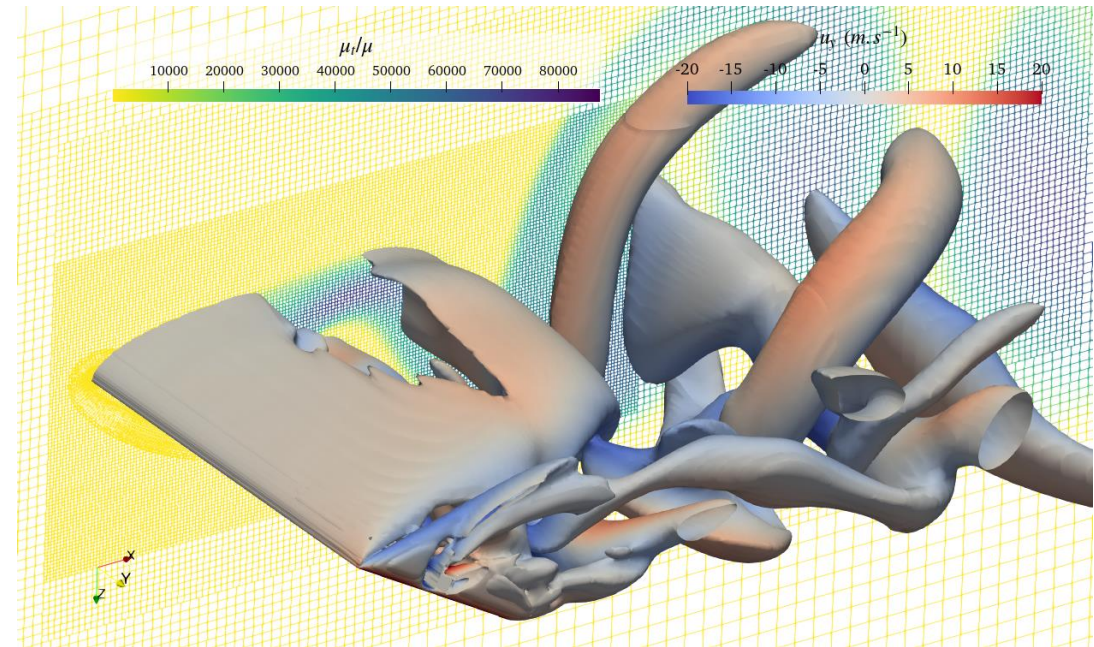
- Influence de l'approche chimère sur une configuration simplifiée table+poutre:
 - Calcul instationnaire $k - \omega SST$,
 - Comparaison FluentMeshing/Chimère (ICEM)
 - Maillages bas Reynolds et loi de paroi,
 - Configuration 3D symétrique (calcul sur $\frac{1}{2}$ envergure)



Maillage	y^+	Cellules
Fluent	45	3461792
Chimère	2	5906862
Chimère	50	4893746
Chimère	120	4686696
Chimère	190	4600258
Chimère	45	3874236



- Validation de l'approche chimère sur une configuration simplifiée table+poutre:
 - Influence de la méthodologie de maillage et du raffinement : $\sim 1.5\%$ sur les efforts verticaux et horizontaux de la table,
 - Dynamique de l'écoulement conservée (pics se retrouvent aux mêmes fréquences),
 - ➔ Validation de l'utilisation de la méthode Chimère,
 - ➔ Possibilité d'utiliser des maillages loi de paroi en configuration massivement décollée.

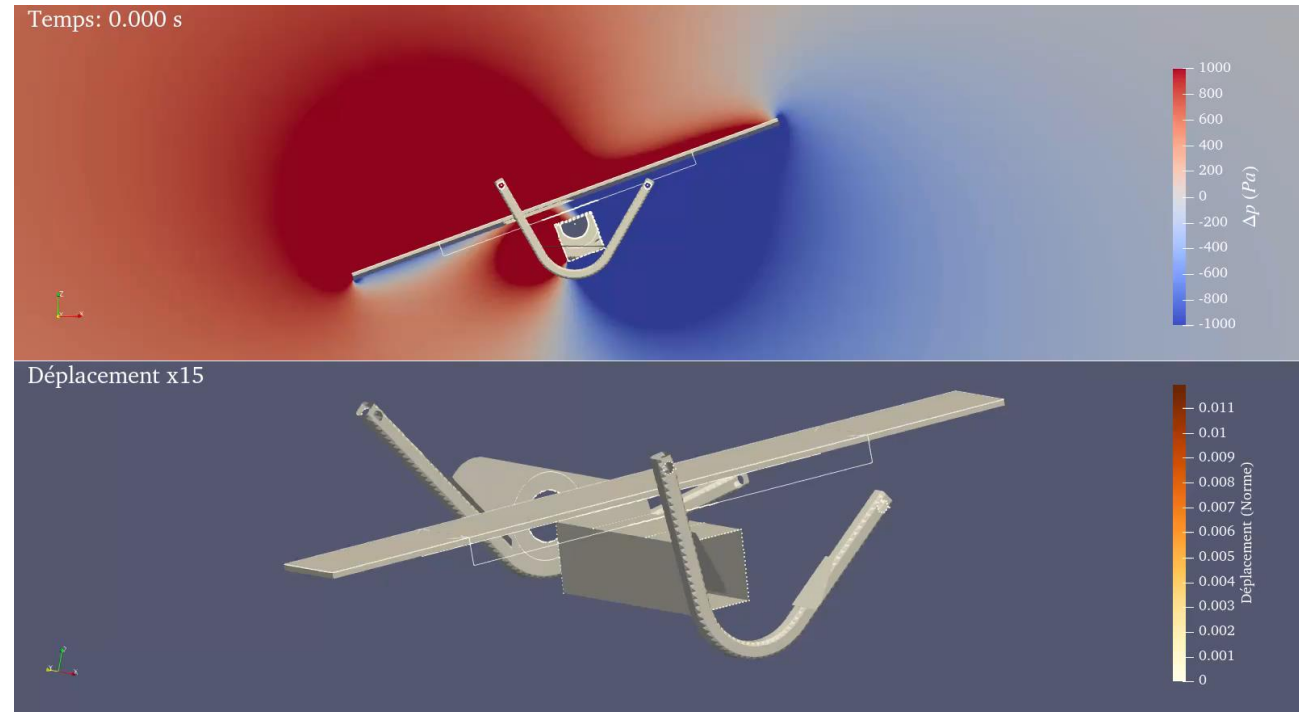
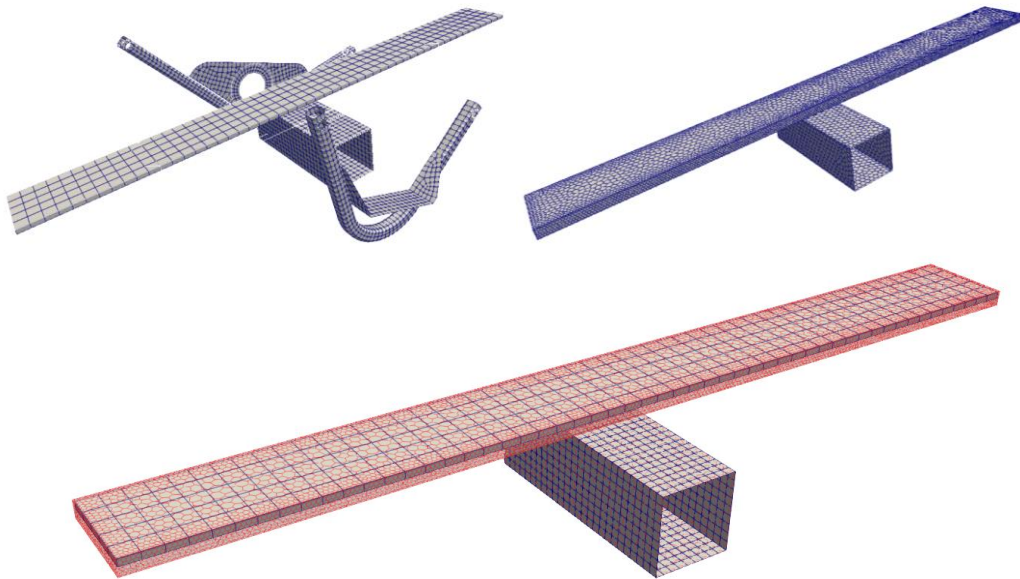


Maillage chimère - Champ instantané : iso-surface du critère Q (vue de dessous)

Prémices d'interaction fluide structure

Méthodologie préliminaire développée sur un cas test permettant :

- Itérer plus rapidement
- Bénéficier d'une ressource de calculs faible
- Prendre en compte les spécificités géométriques et de modélisation du problème (mapping entre deux géométries différentes entre structure et fluide)



La suite?

- Continuer le développement de la canopée
- Etudes Interaction Fluide Structure
- Automatisation de la création des modèles



Josselin GUEDON

Ingénieur Calcul

Mail : josselin.guedon@tse.energy

www.tse.energy