

## Ex1 : Rénovation du réseau de transports urbains de Dijon : étude du centre d'exploitation

Un réseau de transport composé de 33 rames de tramway et de 215 bus nécessite un centre d'exploitation. À Dijon, le centre d'exploitation du nouveau réseau de transport a été installé dans les anciens locaux de la SNCF, idéalement situés près des voies.



Figure 9 : anciens bâtiments et centre d'exploitation réhabilité

L'un des objectifs a été de conserver le patrimoine architectural des 10 000 m<sup>2</sup> d'anciens locaux. 20 000 m<sup>2</sup> de nouveaux bâtiments y ont été ajoutés. L'ensemble accueille l'administration, le stockage des rames, le poste de pilotage centralisé, la maintenance...

---

*Objectifs de cette partie : vérifier* que la structure des bâtiments permet l'installation de panneaux solaires. **Déterminer** la production de la centrale solaire.

---

La réhabilitation de l'ancien bâtiment a été l'occasion d'installer des panneaux photovoltaïques sur les toits dont la pente est orientée au sud.

La charpente du bâtiment (voir figure 11) est constituée d'un ensemble de structures métalliques appelées « fermes », espacées de six mètres. La couverture du bâtiment est réalisée par des tôles en acier galvanisé.



Figure 10 : vue générale du centre d'exploitation

Pour vérifier la résistance d'une charpente, l'étude doit être menée dans des conditions extrêmes appelées : état limite ultime (ELU).

Pour la zone géographique de Dijon, les charges extrêmes dues à la neige sont de 600 N·m<sup>-2</sup>.

Pour vérifier la résistance de la structure, il faut évaluer la tenue de l'élément le plus faible. Une étude préliminaire a permis de localiser l'élément le plus sollicité qui est la poutrelle repérée dans le document technique DT4.

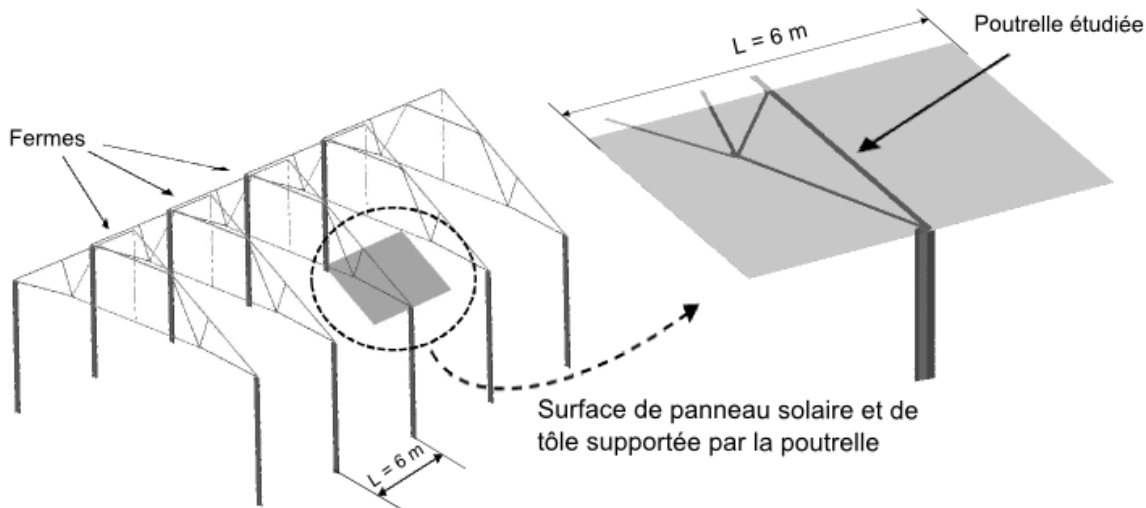


Figure 11 : architecture de la structure

**Hypothèses simplificatrices** : les charges appliquées seront réparties uniformément sur toute la longueur de la poutrelle. Le poids de la poutrelle est négligé par rapport aux autres actions. Le problème est considéré comme plan.

Prendre  $\|\vec{g}\| = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

**Q1.** À partir du descriptif précédent, de la figure 11, des documents techniques DT4 et DT5, **calculer** la surface de panneau solaire que supporte la poutrelle étudiée. **Calculer** le poids de la neige, des panneaux et des tôles sur cette surface. **Calculer** le poids total correspondant à l'état limite ultime et **calculer** la norme de sa composante suivant  $\vec{y}$ . À partir de cette dernière valeur, **déduire** la charge linéique maximale  $p \text{ (N}\cdot\text{mm}^{-1}\text{)}$  supportée par la poutrelle.

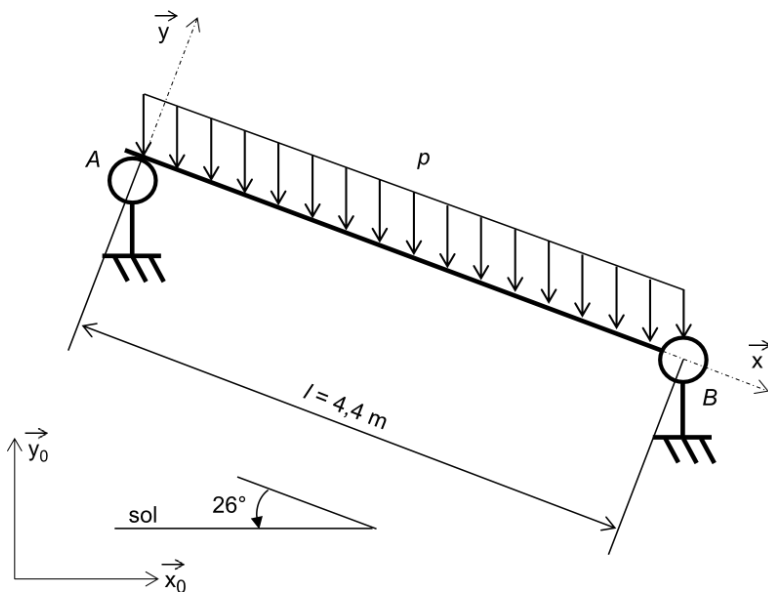


Figure 12 : modélisation de la poutrelle et des conditions aux limites

La poutrelle est inclinée d'un angle de  $26^\circ$  par rapport au sol.

Ses appuis sur la structure peuvent être modélisés, en première approche, par une liaison sphère plan de normale  $(A, \vec{y})$  et par une liaison pivot d'axe  $(B, \vec{z})$ .

Le chargement  $p$  induit des sollicitations de compression et de flexion dans la poutrelle. Par la suite la compression sera négligée.

Le cahier des charges impose à la poutrelle de vérifier les deux critères ci-dessous.

Critère	Grandeur à vérifier	Niveau
Contrainte	CS : coefficient de sécurité	$CS = 2$
Déplacement	$U_y$ : déplacement maximal admissible	$U_y < \frac{l}{200}$

$l$  est la distance entre les liaisons de la poutre avec la structure.

- $M_{f_{Max}}$  : moment de flexion maximal (N·mm) ;
- $p$  : charge linéique (N·mm<sup>-1</sup>) ;
- $l$  : longueur de la poutre (mm) ;

$$M_{f_{Max}} = \frac{p \cdot l^2}{8}$$

- $\sigma_{max}$  : contrainte normale (MPa) ou (N·mm<sup>-2</sup>) ;
- $W_{x-x}$  : module de flexion de la section (mm<sup>3</sup>) ;

$$\sigma_{max} = \frac{M_{f_{Max}}}{W_{x-x}}$$

$$\sigma_{max} \leq \frac{Re}{CS}$$

- $Re$  : limite élastique du matériau (en MPa) ;
- $CS$  : coefficient de sécurité.

**Q2. Calculer** le moment de flexion maximal  $M_{f_{Max}}$  (le résultat sera exprimé en N·mm).

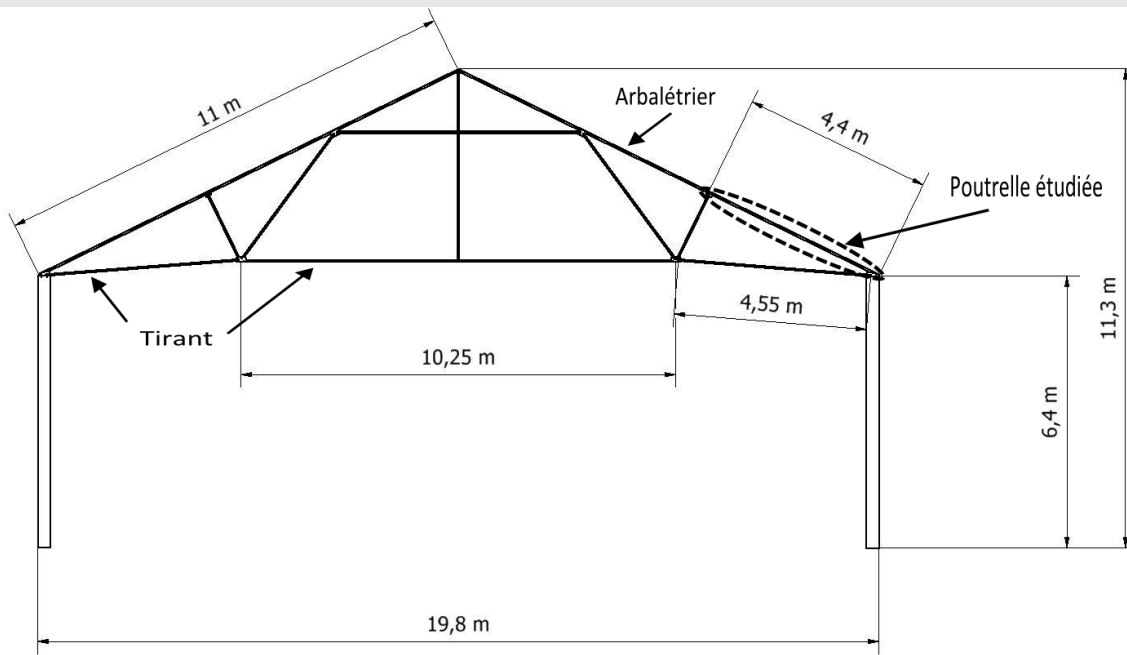
La poutre est un IPE 180 (voir document technique DT4).

**Q3.** À partir des caractéristiques de la poutre données dans le document technique DT4, **calculer** la contrainte  $\sigma_{max}$  pour cette poutrelle. Le résultat sera exprimé en MPa. **Conclure** sur la résistance de la poutrelle.

**Q4.** À partir du tableau ci-dessus, **calculer** le déplacement maximal admissible  $U_y$ . Le résultat sera exprimé en mm.

Le document technique DT4 fournit un modèle numérique de la déformée de la poutrelle sous charge extrême de la neige, des panneaux solaires et des tôles.

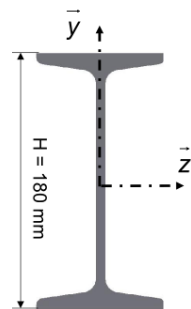
**Q5.** À partir des résultats donnés par la simulation (voir document technique DT4), **vérifier** la validation du critère de déplacement. **Conclure** sur le respect des critères.



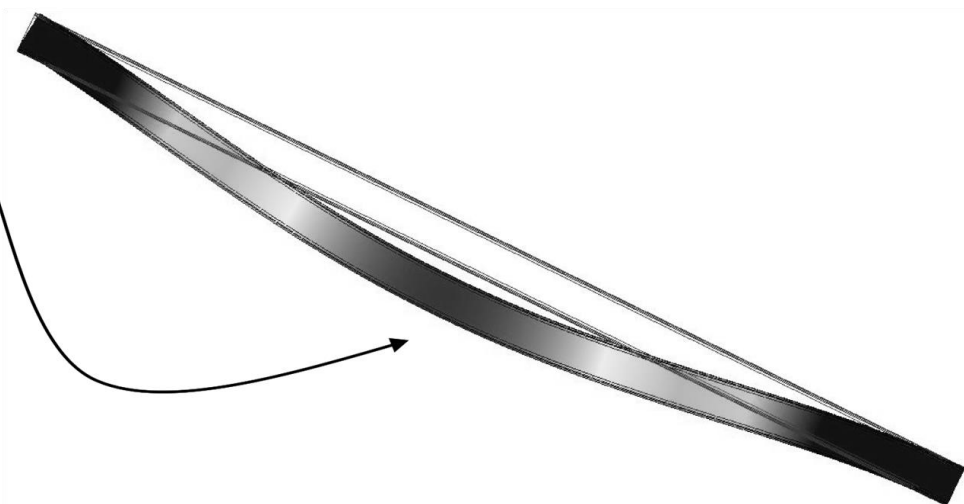
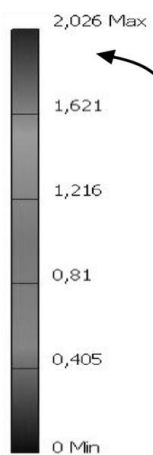
Ferme en treillis dit de « Polonceau »

#### Caractéristiques de la poutre IPE 180

- longueur :  $l = 4,4 \text{ m}$  ;
- matériau : acier doux ;
- limite élastique :  $Re = 207 \text{ MPa}$  ;
- module de flexion de la section :  $W_{x-x} = 149 \text{ cm}^3$ .



Type : Déplacement  
Unité : mm



Déformée de la poutrelle sous charge extrême

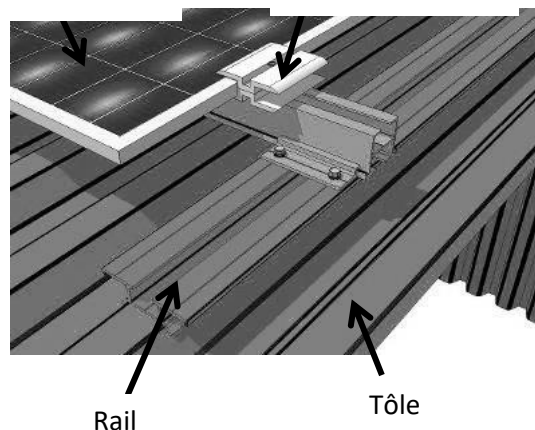
## Caractéristiques des panneaux solaires

Les panneaux solaires sont assemblés sur une structure en acier (rails/poutres) par l'intermédiaire de blocs de fixation. Les rails étant bloqués sur les tôles du toit de la charpente métallique.

Panneau solaire

Bloc de fixation

Masse surfacique de l'ensemble (panneaux solaires, rail, bloc de fixation)	25	kg·m <sup>-2</sup>
Masse surfacique des tôles	8	kg·m <sup>-2</sup>



Caractéristiques électriques		TE 2000				TE 2200				
Puissance typique		180	190	200	210	200	210	220	230	240
Puissance minimale (W)		175	185	195	205	195	205	215	225	235
Puissance maximale (W)		185	195	205	215	205	215	225	235	245
Limite de classe de puissance Wc		-5 / +5 Wc				-5 / +5 Wc				
Limite de classe de puissance %		±2,78%	±2,63%	±2,50%	±2,38%	±2,50%	±2,38%	±2,27%	±2,17%	±2,08%
Tension à puissance max.	Vpm (V)	26,3	26,5	26,7	26,9	29,3	29,5	29,7	29,9	30,1
Intensité à puissance max.	Ipm (A)	6,9	7,2	7,5	7,8	6,9	7,2	7,5	7,8	8
Tension circuit ouvert	Voc (V)	32,5	32,7	32,9	33,1	35,9	36,2	36,5	36,8	37
Courant de court circuit	Isc (A)	7,6	7,8	8	8,2	7,6	7,8	8	8,2	8,3
Cellules										
Taille		156 x 156 mm				156 x 156 mm				
Disposition		54 cellules / 6 x 9				60 cellules / 6 x 10				
Garantie										
Garantie de production		25 ans - 80 % de la puissance minimale / 10 ans en milieu maritime								

Tests réalisés dans les conditions standards STC : Ensoleillement 1000 W/m<sup>2</sup>; Am 1,5; Température 25°C

## Ex2 : Nacelle gyrostabilisée pour prise de vue aérienne par multicoptère

L'étude porte sur l'analyse de la résistance du plateau lorsqu'il supporte le poids de l'appareil photographique.

Pour pouvoir affirmer que le plateau est correctement dimensionné, il faut que les critères suivants soient respectés :

- lors de la déformation, le déplacement maximal d'un point ne doit pas dépasser  $d_{max} = 0,5 \text{ mm}$  ;
- le facteur de sécurité doit être au minimum égal à  $s_{min} = 2,5$  (rappel : le facteur de sécurité  $s$  est le rapport entre la limite élastique et la contrainte réelle).



Le plateau actuel est en alliage d'aluminium de limite élastique  $Re = 100 \text{ MPa}$ .

Un logiciel de simulation permet de visualiser les contraintes et les déplacements au sein du plateau lorsqu'il supporte le poids d'un appareil photographique de masse 1 kg (figure 12).

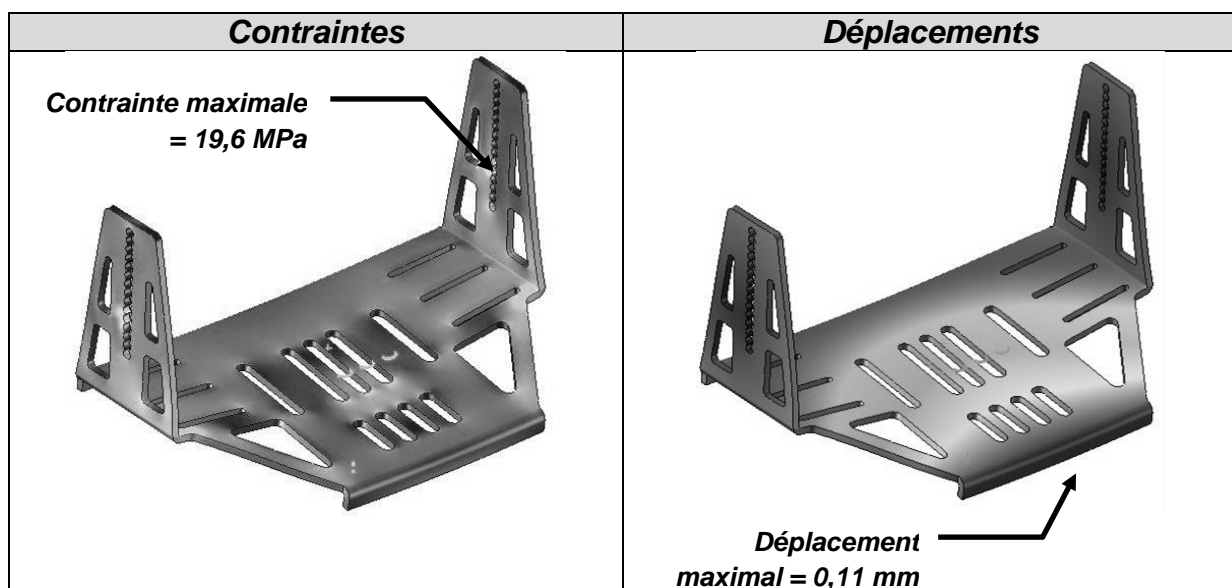


Figure 12 : résultats issus de simulations

Q1. **Vérifier**, en utilisant les données indiquées sur la figure 12, que le plateau est correctement dimensionné.

On cherche maintenant à diminuer la masse du plateau en modifiant le matériau et/ou l'épaisseur du plateau (le plateau actuel est réalisé à partir d'une tôle en alliage d'aluminium d'épaisseur  $e = 3 \text{ mm}$  et de masse  $m = 190 \text{ g}$ ).

Différentes possibilités sont envisagées et chacune a fait l'objet de calculs en simulation dont les résultats sont réunis dans le tableau suivant :

<b>Matériau et épaisseur</b>	<b>Variation de masse par rapport au plateau actuel</b>	<b>Déplacement maximal (en mm)</b>	<b>Facteur de sécurité</b>
Alliage d'aluminium $e = 2 \text{ mm}$	- 33 %	0,3	2,7
Plastique ABS $e = 3 \text{ mm}$	- 63 %	3,6	2,3
Acier $e = 1 \text{ mm}$	+ 4 %	0,7	3,8

Tableau 3

Q2. En cinq lignes au maximum, **rédigé** une synthèse des résultats contenus dans ce tableau en indiquant les points positifs et les points négatifs de chacune des possibilités envisagées. En conclusion, **préciser** si une ou plusieurs de ces possibilités peut convenir pour la réalisation du plateau.