

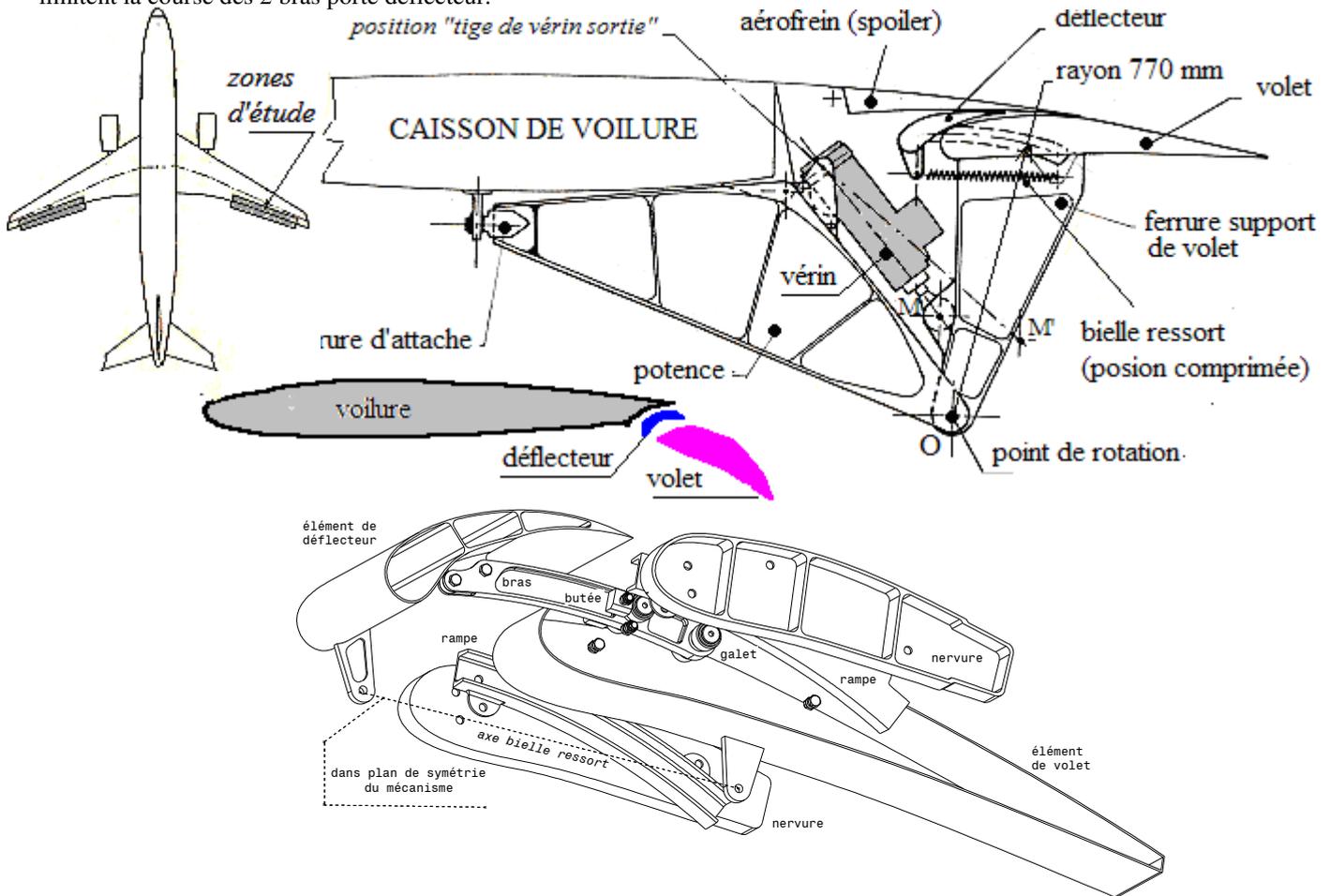
## DEFLECTEUR DE VOLET HYPERSUSTENTATEUR DEBORD DE FUITE

### 1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Résoudre une étude de statique graphique, appliquer les relations de comportement usuelles des poutres pour vérifier la tenue des pièces aux sollicitations extérieures d'un ensemble structural aéronautique.

### 2. MISE EN SITUATION

Les volets hypersustentateurs sont des dispositifs qui permettent aux ailes d'un avion de conserver leur portance à la vitesse la plus basse possible et réduire ainsi sa vitesse de décrochage. Les mises en plan représentent l'un de ces mécanismes qui permet d'actionner le volet et son déflecteur. La rotation du volet autour du point O est commandée par un vérin hydraulique (course MM') dont le corps est articulé sur la potence fixée sur l'intrados à l'arrière du caisson de voilure. Chaque volet porte un déflecteur. Ce dernier peut s'éloigner du volet en se déplaçant dans 4 rampes circulaires fixées sur les nervures de ce volet. Les 2 bras liés au déflecteur porte 4 paires de galets qui roulent sur ces rampes circulaires. Les rotations « déflecteur/volet » et « volet/caisson de voilure » se font autour du même axe, noté point de rotation O. Quatre butées liées aux nervures du volet limitent la course des 2 bras porte déflecteur.



### 3. ETUDE STATIQUE GRAPHIQUE

On se propose d'étudier l'équilibre de l'ensemble isolé « **déflecteur-2 bras porte déflecteur-8 galets** » en configuration de décollage ou d'atterrissage à partir d'une résolution graphique réalisée sur la mise en plan de la page 4.

*Echelles* : forces : 1mm pour 50N ; dimensions : 1/ 3.25

*Hypothèses* : liaisons parfaites, poids négligés pour les pièces étudiées, mécanisme possédant un plan de symétrie (XY)

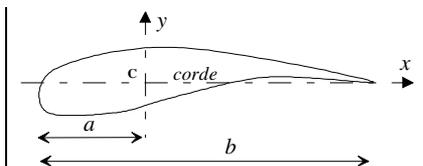
*Données* :

- efforts aérodynamiques extrêmes sur le déflecteur dans le repère local (xy) lié à la corde :  $F_x = - 800 \text{ N}$  et  $F_y = 4500 \text{ N}$ ,

- indiquer le centre de poussée A (rapport  $a/b=0.37$ ) et réduire ces efforts à leur résultante  $\vec{A}$

- action résiduelle de la bielle à ressort, lorsqu'elle est détendue, modélisée par une force  $\vec{R} = X_R \vec{X} = -500\vec{X}$  (N)

- actions des 4 butées sur 4 galets modélisées par une force  $\vec{B}$  à déterminer



- actions des 4 rampes circulaires sur les 8 galets modélisées par des 2 forces  $\vec{G1}$  et  $\vec{G2}$  à déterminer  
 En préalable à l'étude statique graphique, dessiner dans le plan (XY) le modèle poutre droite (tracé de la ligne moyenne) d'un bras avec son chargement (pour simplifier on considère qu'il s'agit de la moitié des efforts connus précédents soit  $\vec{A}/2$  et  $\vec{R}/2$ ) et ses liaisons avec les 2 butées et les 2 rampes circulaires du volet afin de bien en appréhender son comportement. Après l'étude d'équilibre localiser le contact des rampes circulaires sur les galets.

#### 4. EDEDES DU COMPORTEMENT ELASTIQUE DES PIECES

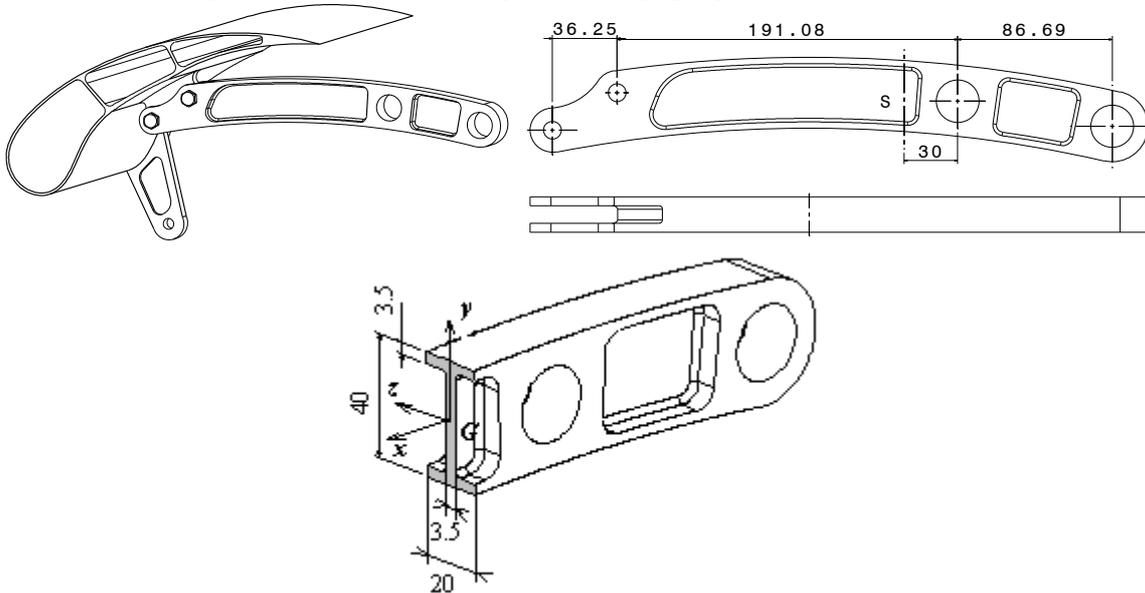
Pour la suite, toutes les études sur le comportement des pièces seront faites en utilisant le matériau suivant :

Nuances normalisées	Module d'élasticité $E$ (MPa)	Coef. de Poisson $\nu$	Masse volumique $\rho$ ( $kg/m^3$ )	Résistance à la rupture à la traction $R_r$ (MPa)	Limite élastique à la traction $R_e$ (MPa)
36 Ni Cr Mo 16	205000	0.3	7800	1000	800

##### 4.1 Tenue d'un bras

Le bras porte déflecteur à une section en I. On se propose de vérifier la tenue d'une section droite « S » de ce bras aux sollicitations extérieures. On donne le vecteur position  $\vec{RA} = x_A \vec{X} + 108 \vec{Y}$

- réutiliser le modèle poutre droite du bras du §3.
- rechercher, au centre géométrique de la section en I, les éléments de réduction du torseur de cohésion ; en donner une représentation graphique
- en déduire la nature des sollicitations dans cette section
- déterminer les contraintes engendrées ; en donner une représentation graphique.

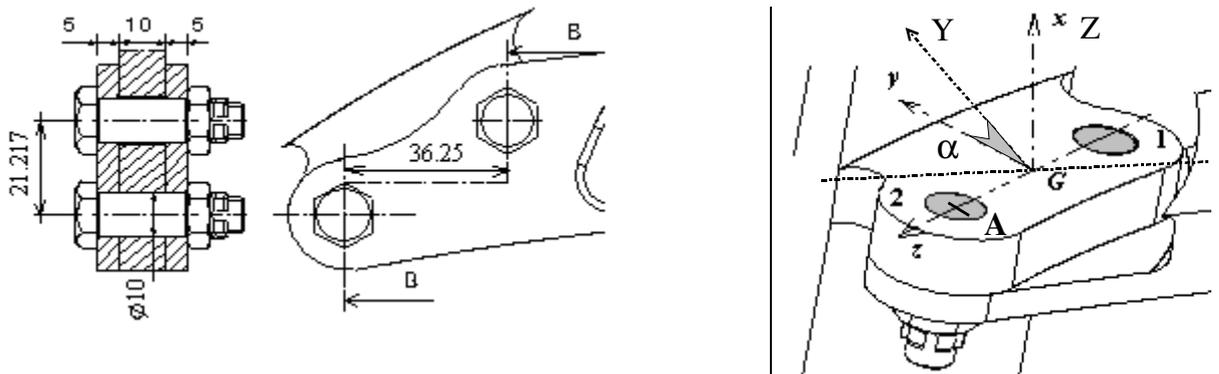


##### 4.2 Liaisons structurales déflecteur-bras

Le déflecteur est lié à chaque bras par 2 boulons ajustés identiques. On se propose de vérifier la tenue des boulons aux sollicitations extérieures sur ce déflecteur soit  $\vec{A}/2$  et  $\vec{R}/2$ , en considérant ces efforts situés dans le plan (y z) de la section équivalente de l'assemblage (cf. figure). On considère aussi le point A confondu avec l'axe du boulon ajusté inférieur.

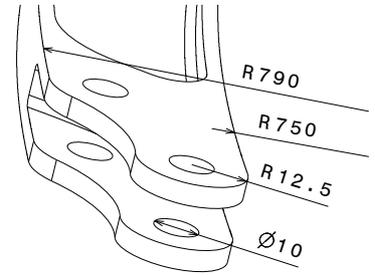
Etapas du travail :

- rechercher au centre géométrique G de la section équivalente de la liaison boulonnée, les éléments de réduction du torseur de cohésion ; en donner une représentation graphique.
- en déduire la nature des sollicitations dans les sections des tiges des boulons.
- déterminer les efforts induits dans chaque section sollicitée ainsi que les contraintes engendrées ; en donner une représentation graphique.



### 4.3 Tenue de la chape double femelle d'un bras pour sa liaison avec le déflecteur

On se propose de vérifier la tenue des joues d'une chape femelle, la **plus fragile**, aux trois modes de détérioration possible d'une chape : rupture par traction, rupture par poinçonnement-cisaillement, détérioration de la portée de l'alésage du logement des boulons ajustés par matage. Les efforts à considérer sont les seules composantes pénalisantes prises sur  $\vec{X}$ , soit  $X_A/2$  et  $X_R/2$ , reprises façon identique par les 2 alésages. Faire une analyse détaillée pour chacun des trois modes. Tenir compte du phénomène de concentration de contraintes.

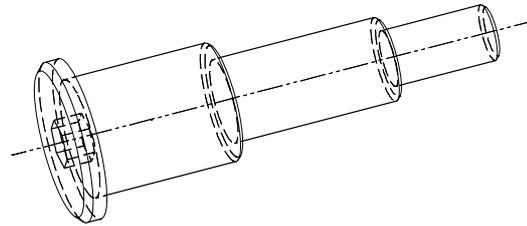
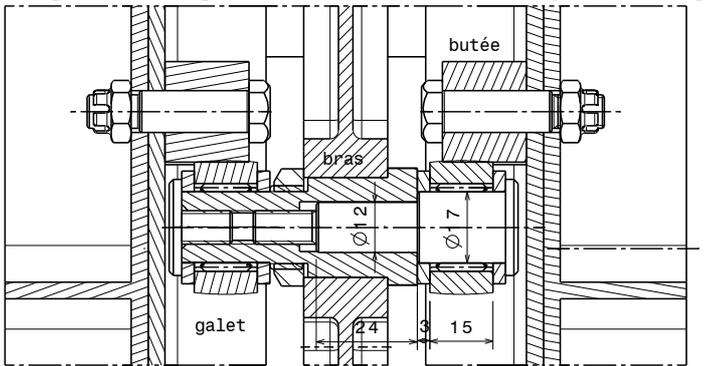


### 4.4 Etude du comportement de l'axe d'un galet

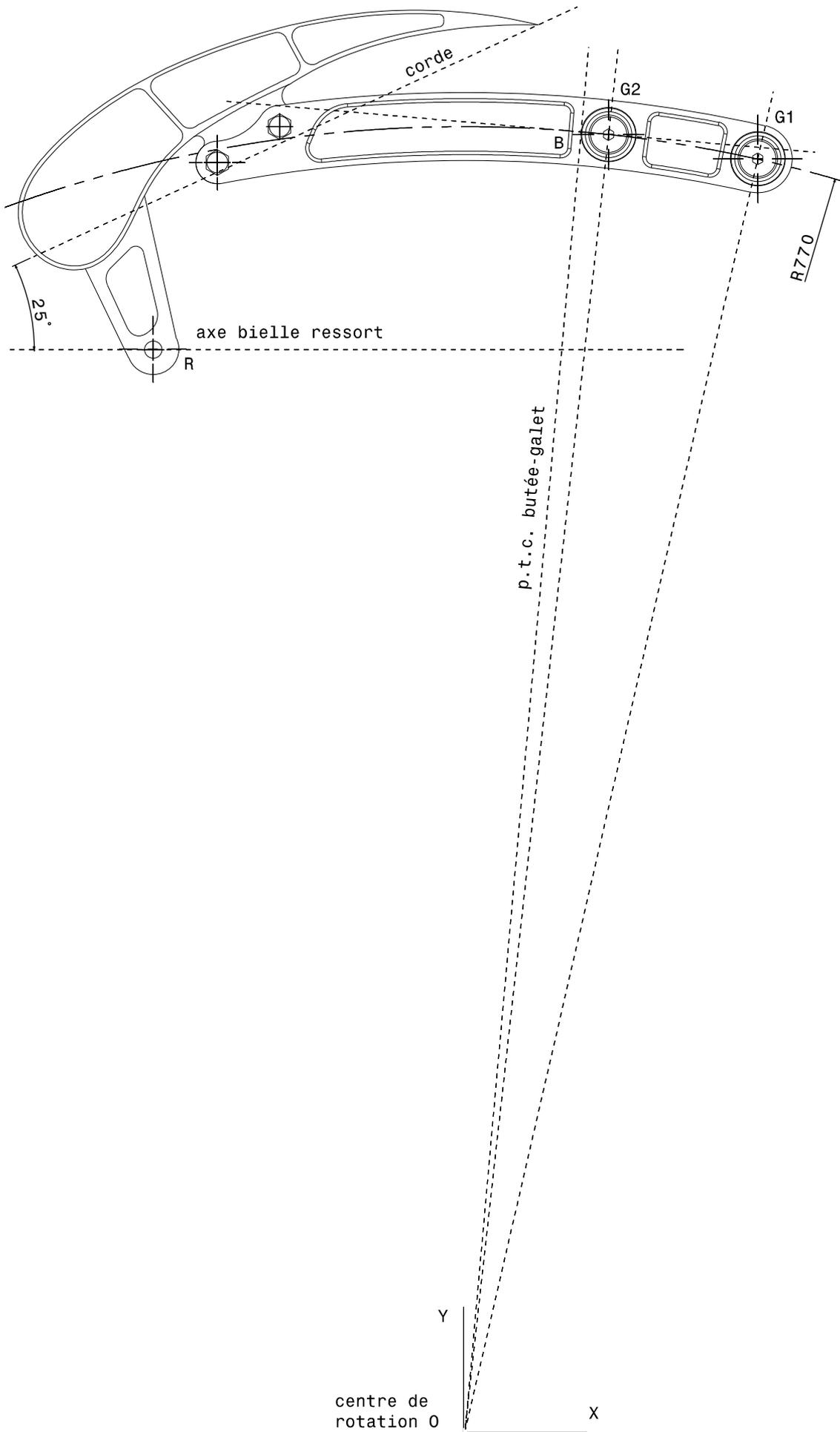
Analyser la conception de la liaison galet-bras. On se propose de vérifier la tenue de l'axe plein le plus chargé de cette liaison :

- définir le modèle de calcul poutre droite en formulant des hypothèses simplificatrices
- identifier la section la plus sollicitée
- rechercher au centre géométrique de cette section, les éléments de réduction du tenseur de cohésion ; en donner une représentation graphique
- en déduire la nature des sollicitations dans cette section
- déterminer les contraintes engendrées ; en donner une représentation graphique

Compléter l'étude par une vérification de non matage de cet axe plein en contact dans l'axe creux



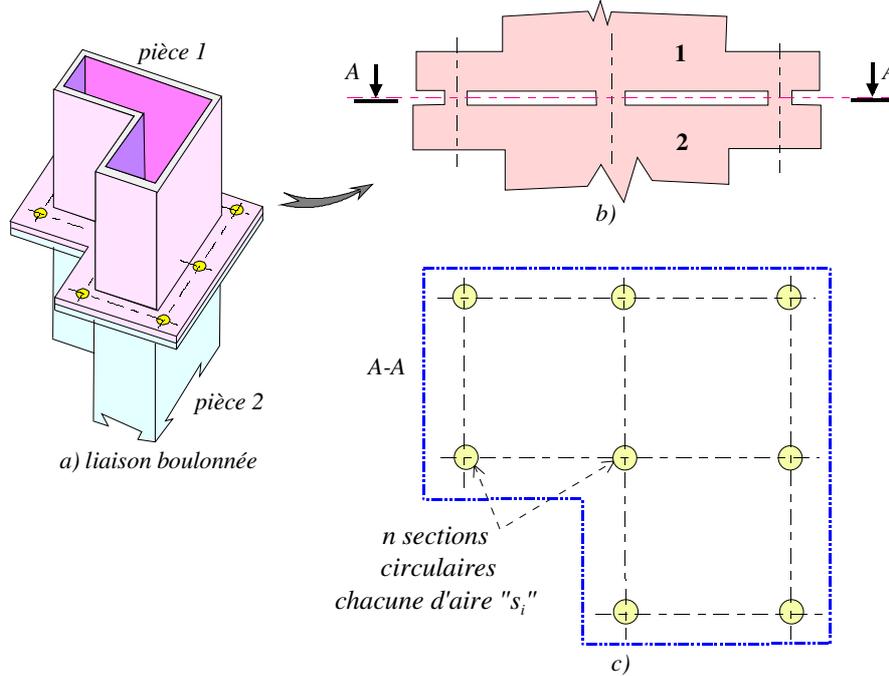
Dispositifs de sustentation sur Boeing 747



5. ANNEXE

ASSEMBLAGES BOULONNES

extraits de l'ouvrage "Dimensionnement des structures" D. GAY et J. GAMBELIN éditions Hermès



Modélisation de l'interface boulonnée

<b>liaison boulonnée de deux pièces 1 et 2</b>	
<i>estimation des sollicitations sur "n" fixations de centre (i) et de section "s"</i>	
<b>données relatives à la jonction boulonnée équivalente</b>	
<p><math>G</math> centre géométrique des "n" sections : <math>\sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n z_i = 0</math> ;</p> <p><math>\vec{y}</math> et <math>\vec{z}</math> axes quadratiques principaux : <math>\sum_{i=1}^n y_i \times z_i = 0</math> et <math>I_y = s \times \sum_{i=1}^n z_i^2</math> ; <math>I_z = s \times \sum_{i=1}^n y_i^2</math> ; <math>I_0 = I_y + I_z</math></p>	
	<p style="text-align: center;"><i>torseur des efforts de cohésion transmissibles (connu; c'est une donnée)</i></p> $\left. \begin{aligned} \vec{R}_{1/2} &= \mathcal{N} \vec{x} + \mathcal{T}_y \vec{y} + \mathcal{T}_z \vec{z} \\ \vec{M}_{G1/2} &= \mathcal{M}_x \vec{x} + \mathcal{M}_y \vec{y} + \mathcal{M}_z \vec{z} \end{aligned} \right\}_G$
<b>contraintes au centre (i) d'une section de fixation</b>	
<p>♦ <i>contrainte normale</i> : <math>\sigma_{xi} = \frac{\mathcal{N}}{n \times s} + \frac{\mathcal{M}_y}{I_y} \times z_i - \frac{\mathcal{M}_z}{I_z} \times y_i</math></p> <p>♦ <i>contraintes tangentielles</i> : <math>\tau_{xyi} = \frac{\mathcal{T}_y}{n \times s} - \frac{\mathcal{M}_x}{I_0} \times z_i</math> ; <math>\tau_{xzi} = \frac{\mathcal{T}_z}{n \times s} + \frac{\mathcal{M}_x}{I_0} \times y_i</math></p>	
<b>effort correspondant sur la section de la fixation n° i</b>	
<p>♦ <i>composante de l'effort normal</i> : <math>X_i = \frac{\mathcal{N}}{n} + \mathcal{M}_y \times \frac{z_i}{\sum_{i=1}^n z_i^2} - \mathcal{M}_z \times \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i^2}</math></p> <p>♦ <i>composantes de l'effort tangentiel</i> : <math>Y_i = \frac{\mathcal{T}_y}{n} - \mathcal{M}_x \times \frac{z_i}{\sum_{i=1}^n (y_i^2 + z_i^2)}</math> ; <math>Z_i = \frac{\mathcal{T}_z}{n} + \mathcal{M}_x \times \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n (y_i^2 + z_i^2)}</math></p> <p>♦ <i>effort tangentiel total</i> : <math>F_{Ti} = \sqrt{Y_i^2 + Z_i^2}</math></p>	

**cas d'un serrage négligé**

**contraintes réglementaires dans la tige n°i**

contrainte normale :

$$\sigma_i = \frac{X_i}{s_0}$$

( $s_0$  : section de la tige à fond de filet)

contrainte tangentielle :

$$\tau_i = \frac{F_{Ti}}{s \text{ (ou } s_0)}$$

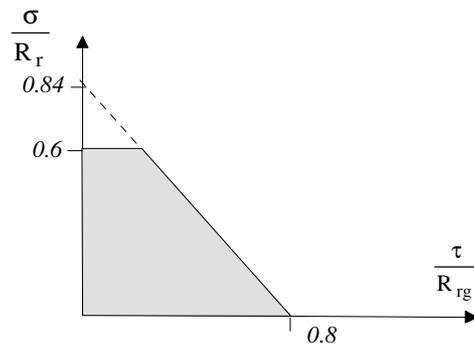
( $s$  ou  $s_0$  : section de la tige à l'interface des pièces assemblées)

**critère de résistance (selon Eurocode)**

si  $\sigma_i > 0$  (traction)  $\frac{\sigma_i}{R_r} \leq 0.6$

$$\frac{\sigma_i}{0.84 \times R_r} + \frac{\tau_i}{0.8 \times R_{rg}} \leq 1$$

( $\sigma_i, \tau_i$ ) doit se trouver à l'intérieur du domaine délimité :



# ELEMENTS DE CORRECTION

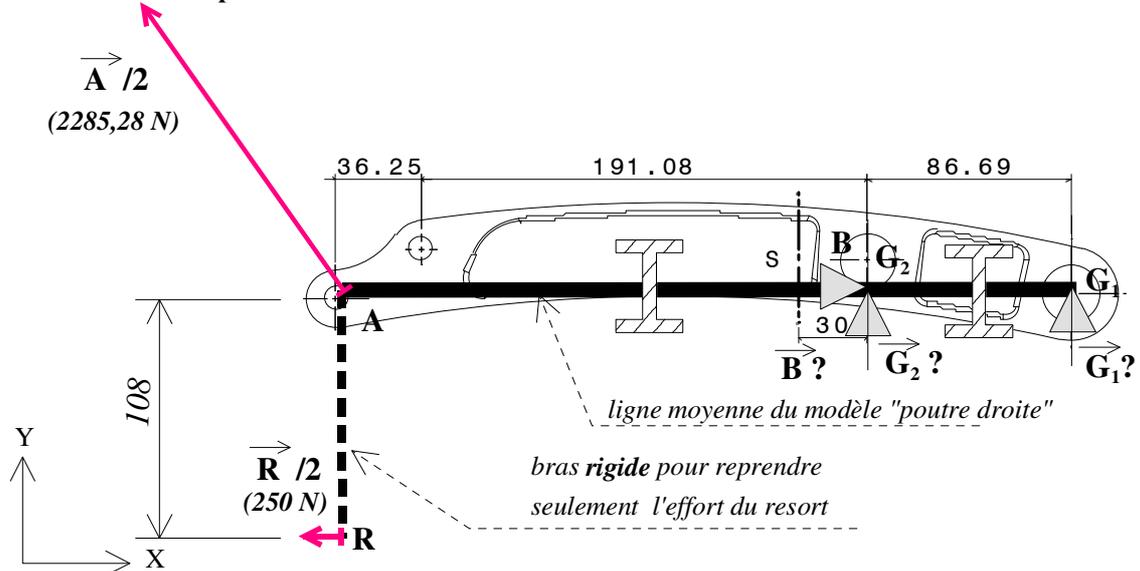
## ◆ ETUDE GRAPHIQUE DE L'EQUILIBRE DU DEFLECTEUR-BRAS

### ● Préliminaire

- positionner le centre aérodynamique sur la corde du profil

- construire la résultante des efforts aérodynamiques : force  $\vec{A} = \vec{F}_x + \vec{F}_y$  avec  $\|\vec{A}\| = \sqrt{800^2 + 4500^2} = 4570,56N$

### ● Modélisation d'un bras en poutre droite



### ● Système isolé : déflecteur-bras

Problème ayant un plan de symétrie (XY)

### ● Bilan des actions mécaniques extérieures au système isolé :

- en A, force  $\vec{A}$  connue

- en R, force  $\vec{R}$  connue

- en B contact ponctuel butée sur le galet  $G_2$  : force  $\vec{B}$  (modélise l'action sur deux galets), point de contact B connu, le support de la force connu, il est perpendiculaire au plan tangent commun donc passe par le centre du galet  $G_2$ , norme **inconnue**

- en  $G_1$  contact ponctuel de la rampe circulaire sur le galet  $G_1$  : force  $\vec{G}_1$  (modélise l'action sur deux galets), point de contact  $G_1$  inconnu, le support de la force connu, il est perpendiculaire au plan tangent commun donc passe par le centre du galet  $G_1$  et le point O centre de courbure du rail circulaire, norme **inconnue**

- en  $G_2$  contact ponctuel de la rampe circulaire sur le galet  $G_2$  : force  $\vec{G}_2$  (modélise l'action sur deux galets), point de contact  $G_2$  inconnu, le support de la force connu, il est perpendiculaire au plan tangent commun donc passe par le centre du galet  $G_2$  et le point O centre de courbure du rail circulaire, norme **inconnue**

### ● Système matériel soumis à 5 forces avec 3 inconnues

### ● Résolution graphique : loi des 3 forces

Il faut réduire le nombre de forces (5) pour se ramener à 3 forces en recherchant les éventuelles résultantes (voir épure complète)

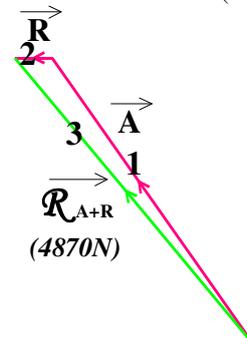
Mode opératoire détaillé à mener sur l'épure complète

- 1° résultante : on pose  $\vec{R}_{A+R} = \vec{A} + \vec{R}$  avec les forces  $\vec{A}$  et  $\vec{R}$  connues,

tracer de cette résultante (**attention** il ne s'agit pas d'une somme vectorielle nulle telle que  $\vec{R}_{A+R} + \vec{A} + \vec{R} = \vec{0}$ ) suivre la chronologie du tracé 1 à 3 sur l'épure ci-contre

mettre en place sur l'épure complète son support qui passe par

le point J :  $\text{sup port } \vec{A} \wedge \text{sup port } \vec{R} \Rightarrow \text{point J}$



- 2° *résultante* : on pose  $\vec{\mathcal{R}}_{G_1+G_2} = \vec{G}_1 + \vec{G}_2$  avec uniquement les supports connus des forces  $\vec{G}_1$  et  $\vec{G}_2$

Ces deux supports se coupant au point O, le support de  $\vec{\mathcal{R}}_{G_1+G_2}$  passe donc par ce point

● **Nouveau bilan des actions mécaniques extérieures au système isolé initial:**

- en B contact ponctuel butée sur le galet  $G_2$ : force  $\vec{B}$ , point de contact B connu, le support de la force connu, il est perpendiculaire au plan tangent commun donc passe par le centre du galet  $G_2$ , norme **inconnue**

- résultante  $\vec{\mathcal{R}}_{A+R} = \vec{A} + \vec{R}$  connue

- résultante  $\vec{\mathcal{R}}_{G_1+G_2}$  support et norme **inconnus**

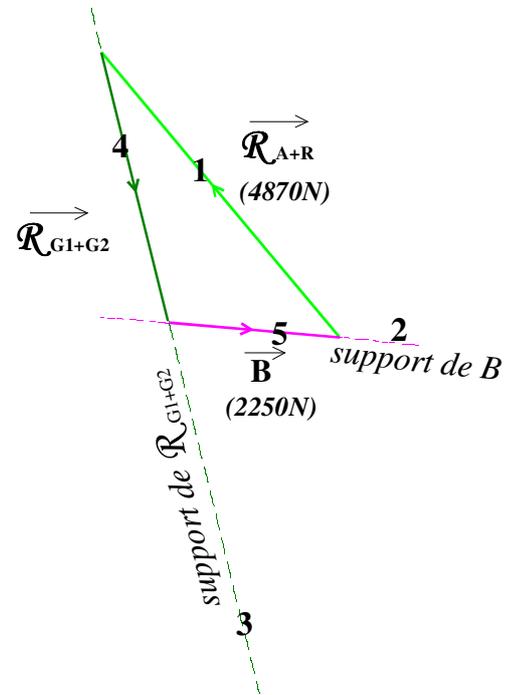
Système matériel soumis maintenant à 3 forces avec 3 inconnues, donc application de la loi des 3 forces possibles

- ces 3 forces doivent avoir un point de concours commun (somme vectorielle des moments nulle)

sup port  $\vec{B} \wedge$  sup port  $\vec{\mathcal{R}}_{A+R} \Rightarrow$  point I sur l'épure complète, donc nécessairement le

support de  $\vec{\mathcal{R}}_{G_1+G_2}$  passant par O passe aussi par I

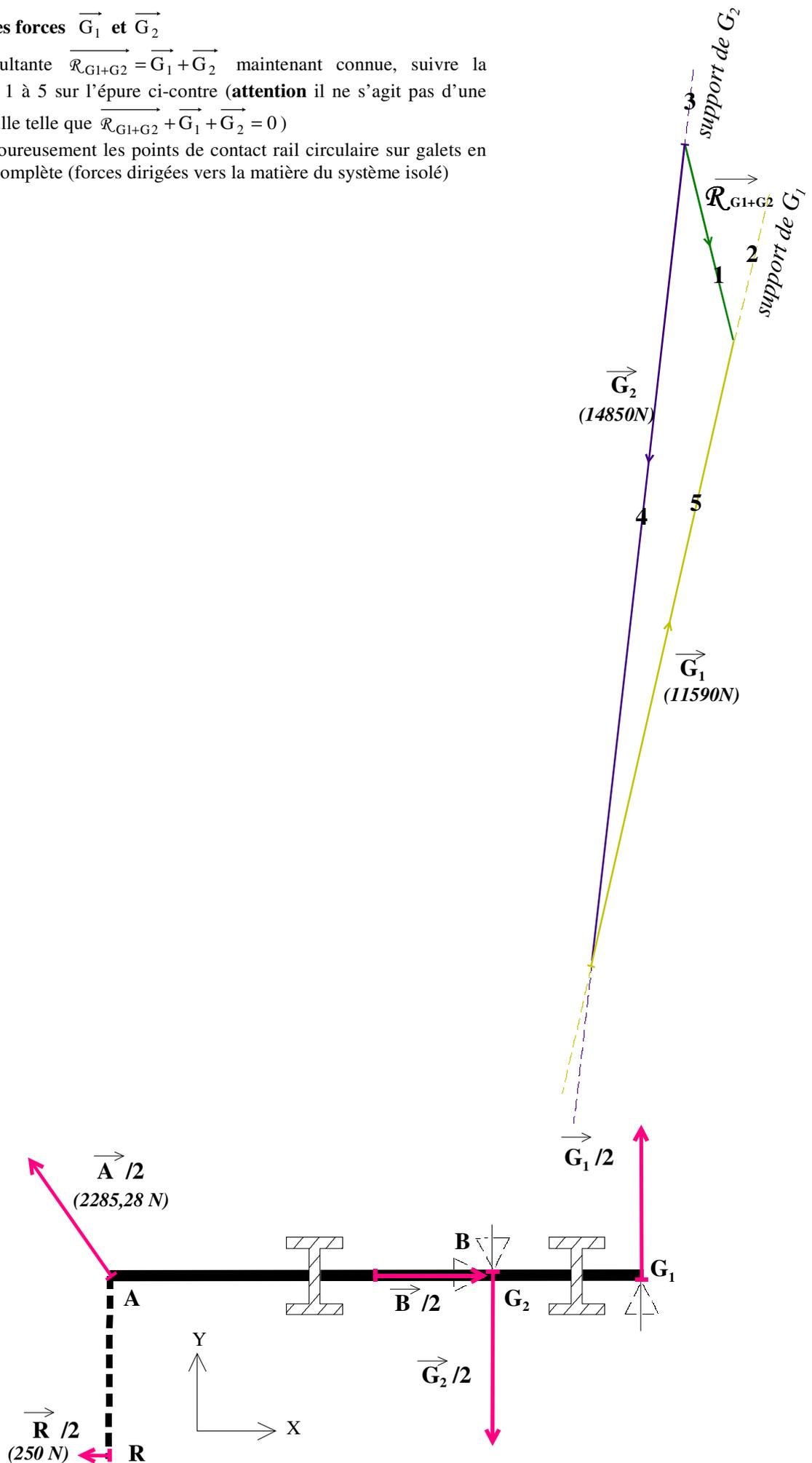
- ces 3 forces doivent avoir le dynamique des forces fermé (somme vectorielle des forces nulle  $\vec{\mathcal{R}}_{G_1+G_2} + \vec{\mathcal{R}}_{A+R} + \vec{B} = \vec{0}$ ), suivre la chronologie du tracé 1 à 5 sur l'épure ci-contre

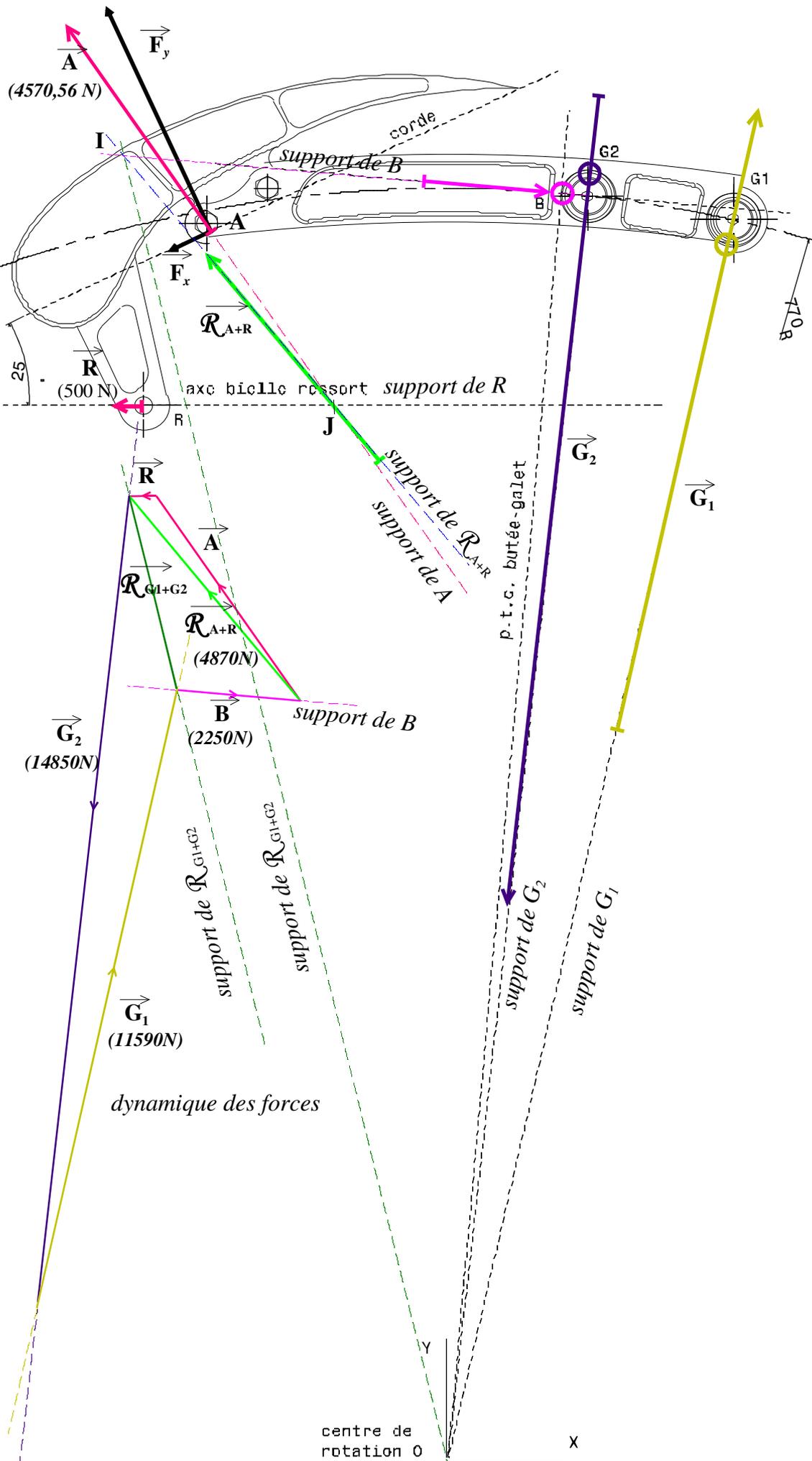


● Détermination des forces  $\vec{G}_1$  et  $\vec{G}_2$

A partir de la résultante  $\vec{R}_{G_1+G_2} = \vec{G}_1 + \vec{G}_2$  maintenant connue, suivre la chronologie de tracé 1 à 5 sur l'épure ci-contre (**attention** il ne s'agit pas d'une somme vectorielle nulle telle que  $\vec{R}_{G_1+G_2} + \vec{G}_1 + \vec{G}_2 = 0$ )

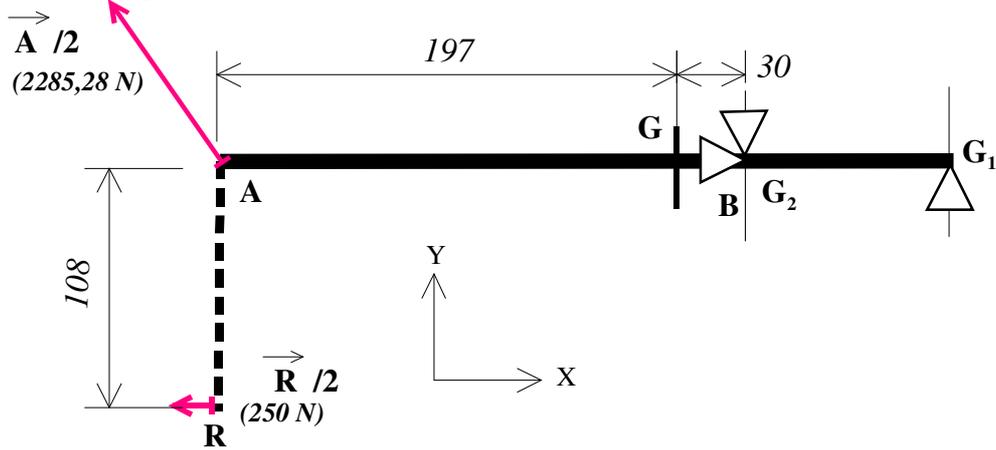
On peut localiser rigoureusement les points de contact rail circulaire sur galets en  $G_1$  et  $G_2$  sur l'épure complète (forces dirigées vers la matière du système isolé)





## ◆ ETUDE DU COMPORTEMENT D'UN BRAS

Le modèle poutre droite retenu pour le calcul est le suivant :



### ● Expression de la résultante aérodynamique dans le repère (XY)

- changement de base : Global (R) au Local ( $r$ ) du déflecteur : soit  $\theta = (\vec{X}, x) = 25^\circ$  (donnée cf. épure statique)

$$\begin{Bmatrix} \vec{x} \\ \vec{y} \\ \vec{z} \end{Bmatrix}_r = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{Bmatrix}_R \Rightarrow \begin{cases} x = \cos\theta \vec{X} + \sin\theta \vec{Y} \\ y = -\sin\theta \vec{X} + \cos\theta \vec{Y} \\ z = \vec{Z} \end{cases}$$

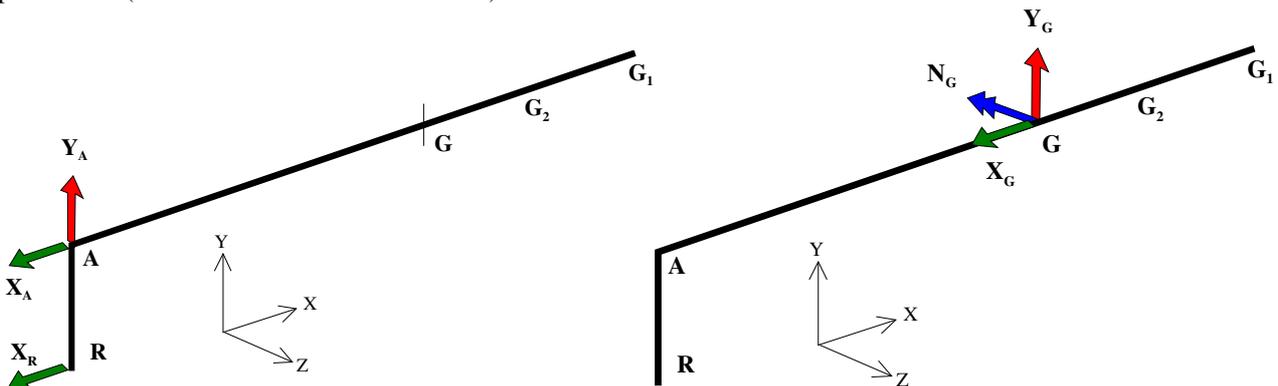
$$\left. \begin{aligned} F_x \vec{x} &= -800 * 0,906 \vec{X} - 800 * 0,422 \vec{Y} \\ F_y \vec{y} &= -4500 * 0,422 \vec{X} + 4500 * 0,906 \vec{Y} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \vec{A} = -2626,82 \vec{X} + 3740,29 \vec{Y}$$

### ● Eléments de réduction du torseur des efforts extérieurs (moitié) appliqués au déflecteur réduits en G de la ligne moyenne d'un bras

$$\{F_{\text{deflec/bras}}\}_G = \left. \begin{aligned} \vec{R}_G &= \vec{A}/2 + \vec{R}/2 = +(-1313,41 - 250) \vec{X} + 1870,15 \vec{Y} = -1563,41 \vec{X} + 1870,15 \vec{Y} \\ \vec{M}_G &= \vec{GR} \wedge \vec{R}/2 + \vec{GA} \wedge \vec{A}/2 = -395419,55 \vec{Z} \end{aligned} \right\}_{G,R}$$

$$\text{où } \vec{GR} \wedge \vec{R}/2 = \begin{bmatrix} \vec{X} & \vec{Y} & \vec{Z} \\ -197 & -108 & 0 \\ -250 & 0 & 0 \end{bmatrix} = -27000 \vec{Z} \text{ et } \vec{GA} \wedge \vec{A}/2 = \begin{bmatrix} \vec{X} & \vec{Y} & \vec{Z} \\ -197 & 0 & 0 \\ -1313,41 & +1870,15 & 0 \end{bmatrix} = -368419,55 \vec{Z}$$

Rappel : ces deux configurations de chargements, représentées sur les figures suivantes, produisent au point G les mêmes effets en déplacements (flèche en G et rotation de section) et en déformations-contraintes de la section droite et



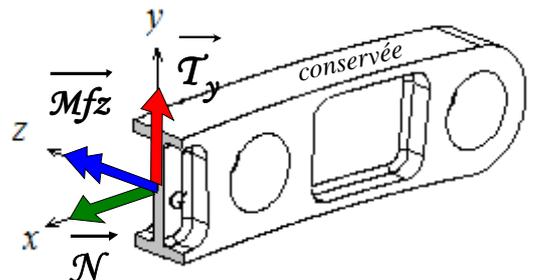
### ● Torseur de cohésion

- changement de base du Local ( $r$ ) de la section en I de la poutre droite au Global (R), soit :

$$\begin{Bmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{Bmatrix}_R = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \vec{x} \\ \vec{y} \\ \vec{z} \end{Bmatrix}_r \Rightarrow \begin{cases} \vec{X} = -\vec{x} \\ \vec{Y} = \vec{y} \\ \vec{Z} = -\vec{z} \end{cases}$$

Torseur de cohésion au centre géométrique G de la section en I (partie supprimée AG et partie conservée GG<sub>1</sub>)

$$\{Coh_{\text{sup/cons}}\}_G = \{F_{\text{deflec/bras}}\}_G$$



$$\{Coh_{sup/cons}\}_G = \left\{ \begin{array}{ll} N_x = +1563,41 & M_t = 0 \\ T_y = +1870,15 & Mf_y = 0 \\ T_z = 0 & Mf_z = +395419,55 \end{array} \right\}_{G,r}$$

● **Contraintes engendrées**

- effort normal  $N$  engendre des contraintes normales :

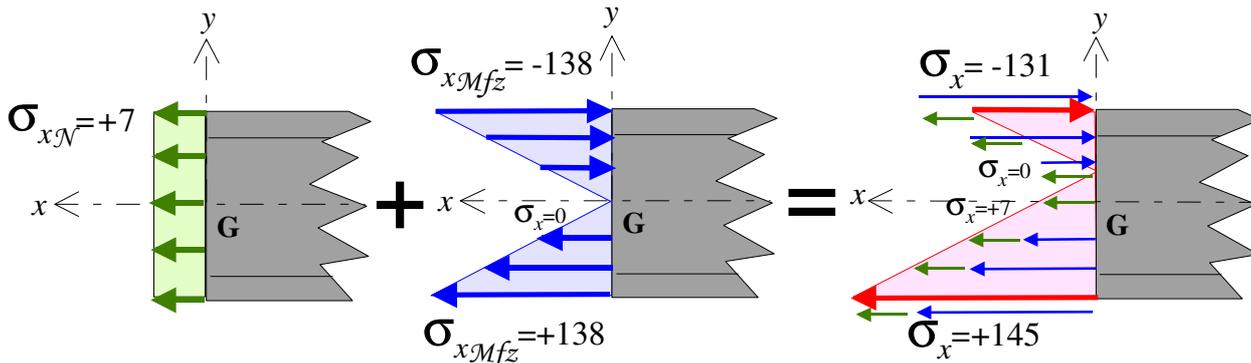
$$\sigma_x = \frac{N}{S_I} = \frac{+1563,41}{225,5} = +7\text{MPa}$$

- moment de flexion  $Mfz$  engendre des contraintes normales :

$$\sigma_{x\max} = -\frac{Mfz}{I_{zz}} \times \pm y_{\max} = -\frac{+395419,55}{57253,3} \times \pm 20 = \mp 138\text{MPa}$$

- en tout point de la section, algébriquement sur l'axe des  $\vec{x}$  on a la contrainte normale résultante des deux effets soit :

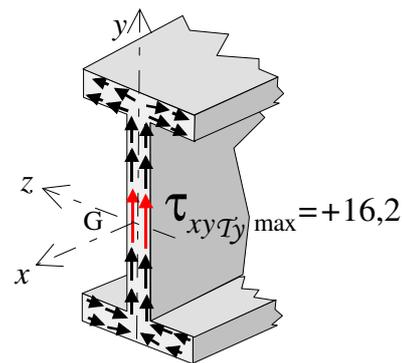
$$\sigma_x = \sigma_{xN} + \sigma_{xMfz}$$



sa valeur maxi est donc une contrainte normale de traction  $\sigma_x = +145\text{MPa}$

- effort tranchant  $T_y$  engendre des contraintes tangentielles, distribution complexe (cf. figure ci-contre°) dans une section en I, on montre que :

$$\tau_{xy\max} = \frac{T_y}{S_{\text{âme I}}} = \frac{+1870,15}{115,5} = +16,2\text{MPa}$$



● **condition de résistance du bras :**

les niveaux de contraintes relevés étant faibles par rapport à la limite élastique de l'acier faiblement allié utilisé ( $Re = 800\text{MPa}$ ), la condition de résistance est donc vérifiée suivant le critère de la contrainte maxi, soit  $\sigma_{x\max} < Re$  et  $\tau_{xy\max} < Re_g$  avec  $Re_g \cong 0,6 Re$

L'utilisation du critère de résistance de Von Mises  $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} < Re$  n'est pas justifiée, en effet quand  $\sigma_x$  est maxi  $\tau_{xy}$  est nul et inversement, donc on se retrouve dans le cas d'utilisation du critère précédent.

◆ **ASSEMBLAGE BOULONNE**

● **Eléments de réduction du torseur de la moitié des efforts extérieurs appliqués au déflecteur réduits au centre géométrique G de la section équivalente de l'assemblage boulonné**

$$\{F_{\text{deflec/bras}}\}_G = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_G = \vec{A}/2 + \vec{R}/2 = +(-1313,41 - 250)\vec{X} + 1870,15\vec{Y} = -1563,41\vec{X} + 1870,15\vec{Y} \\ \vec{M}_G = \vec{GR} \wedge \vec{R}/2 + \vec{GA} \wedge \vec{A}/2 = \left[ -\left(108 + \frac{21}{2}\right) \times 250 - 47677,92 \right] \vec{Z} = -77302,92\vec{Z} \end{array} \right\}_{G,R}$$

$$\text{où } \vec{GA} \wedge \vec{A}/2 = \begin{bmatrix} \vec{X} & \vec{Y} & \vec{Z} \\ -18,12 & -10,5 & 0 \\ -1313,41 & +1870,15 & 0 \end{bmatrix} = -47677,92\vec{Z}$$

● **Torseur de cohésion**

- changement de base du Local (*r*) de la section équivalente des 2 boulons au Global (*R*) :

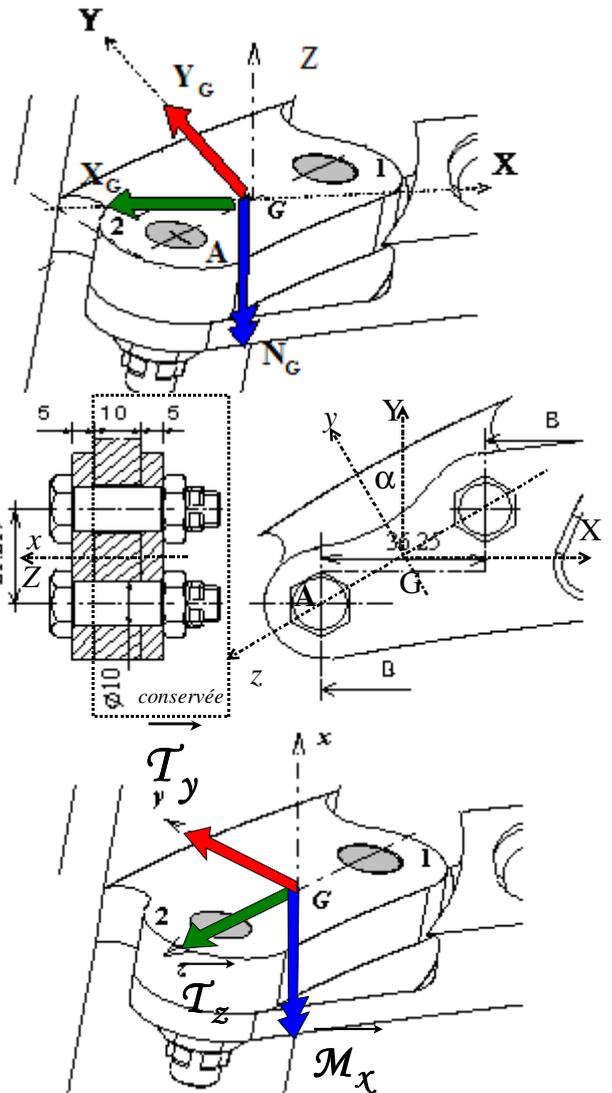
$$\text{soit } \alpha = (\vec{Y}, y) = \arctan\left(\frac{21,217}{36,25}\right) = 30,34^\circ \approx 30^\circ$$

$$\left\{ \begin{matrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{matrix} \right\}_R = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \alpha & -\cos \alpha \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} \right\}_r \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} \vec{X} = -\sin \alpha y - \cos \alpha z \\ \vec{Y} = \cos \alpha y - \sin \alpha z \\ \vec{Z} = x \end{matrix} \right\}$$

Torseur de cohésion au centre géométrique de la section équivalente de l'assemblage boulonné (partie conservée  $x < 0$ )

$$\left\{ Coh_{sup/cons} \right\}_G = \left\{ F_{deflec/bras} \right\}_G$$

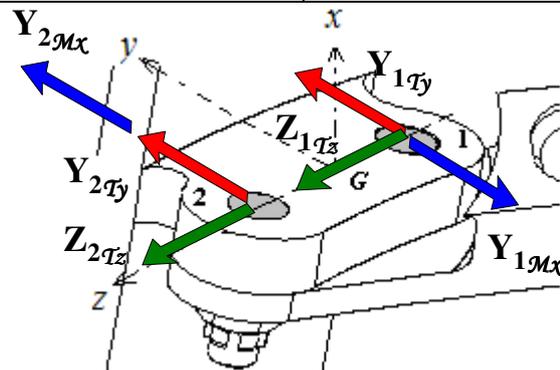
$$\left\{ Coh_{sup/cons} \right\}_G = \left\{ \begin{matrix} N_x = 0 & M_t = -77302,92 \\ T_y = +2401,30 & Mf_y = 0 \\ T_z = +418,8 & Mf_z = 0 \end{matrix} \right\}_{G,r}$$



● **Efforts induits dans les sections des boulons ajustés (cf. §5 Annexe)**

Si l'assemblage est correctement conçu la section cisillée est la section nominale (M10) et non pas la section du noyau  
Ces éléments de réduction du torseur de cohésion induisent des efforts de cisaillement dans les sections des boulons 1 et 2

BOULON 1	BOULON 2
$Y_{1T_y} = \frac{T_y}{2} = + \frac{2401,30}{2} = +1200,65$	$Y_{2T_y} = \frac{T_y}{2} = + \frac{2401,30}{2} = +1200,65$
$Z_{1T_z} = \frac{T_z}{2} = + \frac{418,8}{2} = +209,4$	$Z_{2T_z} = \frac{T_z}{2} = + \frac{418,8}{2} = +209,4$
$Y_{1M_x} = -M_x \times \frac{z_1}{\sum_{i=1}^2 (z_i^2)} = -(-77302,92) \frac{-21}{21^2 \times 2} = -1840,55$	$Y_{2M_x} = -M_x \times \frac{z_2}{\sum_{i=1}^2 (z_i^2)} = -(-77302,92) \frac{+21}{21^2 \times 2} = +1840,55$



● **Contraintes tangentielles moyennes engendrées**

$$\tau_1 = \frac{F_{T1}}{s} = \frac{\sqrt{(Y_{1T_y} + Y_{1M_x})^2 + Z_{1T_z}^2}}{s} = \frac{\sqrt{(1200,65 - 1840,55)^2 + 209,4^2}}{\pi \times 5^2} = 8,57 \text{MPa}$$

$$\tau_2 = \frac{F_{T2}}{s} = \frac{\sqrt{(Y_{2Ty} + Y_{2Mx})^2 + Z_{2Tz}^2}}{s} = \frac{\sqrt{(1200,65 + 1840,55)^2 + 209,4^2}}{\pi \times 5^2} = 38,8 \text{MPa}$$

Reste à comparer ces résultats un critère de résistance spécifique pour vérifier que ces deux boulons restent toujours dans le domaine élastique. Compte tenue du faible niveau des contraintes et du matériau des boulons, quel que soit le critère utilisé la tenue de l'assemblage sera vérifié.