

## ASSEMBLAGES RIVETES

### 1 OBJECTIF

La liaison rivetée étant un assemblage structural réalisé par un grand nombre de rivets, compte tenu de la nature hyperstatique de la liaison et des phénomènes locaux (tolérances, mécanique des contacts) il est impossible de déterminer avec précision les efforts transmissibles (transmission des efforts réalisée normalement par l'adhérence entre les pièces) par chaque rivet pour vérifier d'un point de vue sécurité :

- la condition de non matage entre les surfaces en contact des composants assemblés :
- les conditions de résistance ( $R_{eg}$ ) ou de non rupture en cisaillement ( $R_{rg}$ ) des rivets
- la condition de non rupture en traction ( $R_r$ ) des tôles assemblées.

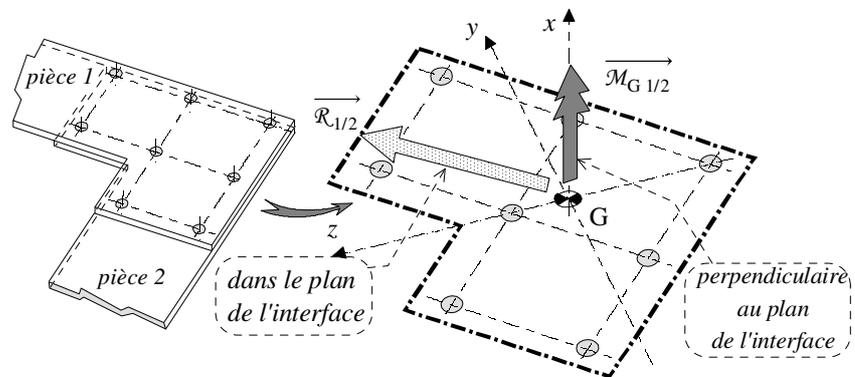
Des hypothèses simplificatrices du comportement de ce type d'assemblage permettent au concepteur d'en faire un pré-dimensionnement rapide. La difficulté est de connaître dans quel domaine, *élastique* ou *plastique* se situe le mode de travail de cet assemblage. De plus au cours des sollicitations le type de matériau utilisé (*ductile* ou *fragile*) a de l'incidence sur l'évolution du comportement de cet assemblage.

Des modèles élément finis plus ou moins élaborés peuvent aider à la conception.

### 2 TRANSMISSIONS DES EFFORTS DANS UN ASSEMBLAGE RIVETE

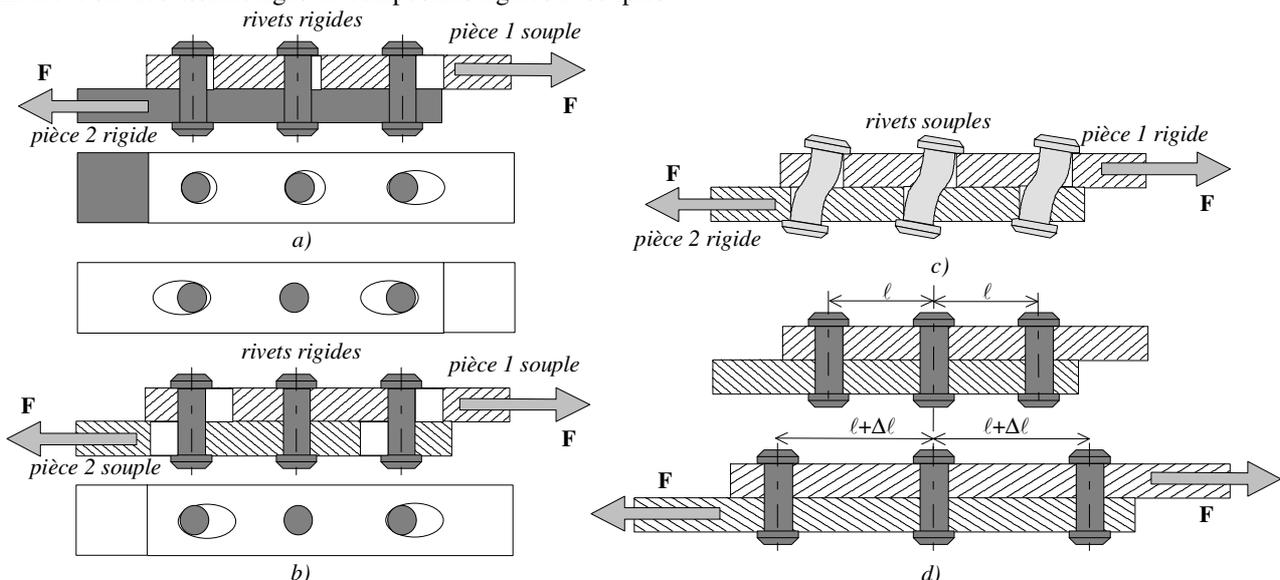
Cas général : torseur de cohésion dans le plan de l'interface rivetée induit par les efforts transmissibles de 1/2 :

$$\{Coh_{1/2}\}_G = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{1/2} = T_y \vec{y} + T_z \vec{z} \\ \vec{M}_{G(1/2)} = M_x \vec{x} \end{array} \right\}_{G,r}$$



Dans le repère local lié au centre géométrique et au plan de l'interface rivetée les deux efforts tranchants et le moment de torsion engendrent des contraintes tangentielles dans le plan de l'interface. Au contact des alésages des pièces et des corps cylindriques des rivets ces deux efforts tranchants engendrent des pressions de contact.

□ *Remarques* : en préliminaire à l'étude des divers comportements proposés, on peut s'y familiariser par une approche intuitive sur des assemblages de composants rigides et souples.



A partir de l'observation des zones déformées, on peut constater immédiatement que dans le domaine *élastique* :

- a) une répartition équitable des efforts dans les rivets est impossible (déformations différentes et décroissantes des alésages)
- b) une répartition équitable des efforts dans les rivets extrêmes est possible (déformations des alésages) et un effort nul dans le rivet médian (pas de déformation d'alésage)
- c) une répartition équitable des efforts dans les rivets est possible (déformations identiques des rivets).

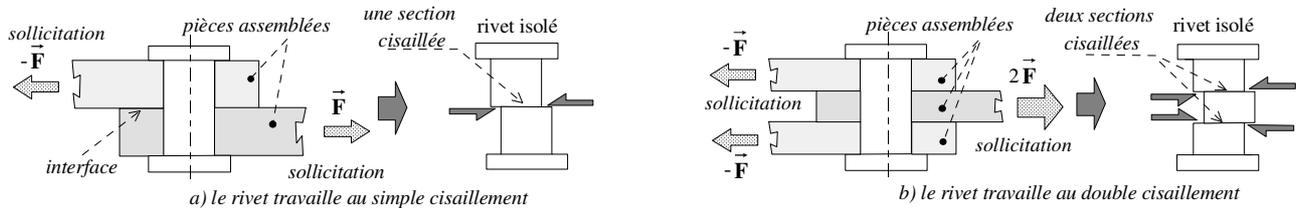
- d) une répartition équitable des efforts dans les rivets extrêmes est possible et un effort nul dans le rivet médian (assemblage parfaitement monolithique)

### 3 HYPOTHESES COMMUNES A TOUS LES MODELES DE CALUL

#### 3.1 Pour les rivets

- matériau identique
- diamètre identique
- modes de travail des rivets (pas de flexion du corps cylindrique, seule une sollicitation en cisaillement dans la section (cf. figure a) et b)). L'état de contraintes dans la section étant complexe, on peut le résumer de façon simplifiée sous la

forme d'une contrainte tangentielle moyenne, soit  $\tau_{\text{moy}} = \frac{\text{effort tranchant}}{\text{aire section rivet}}$



Les efforts tranchants sollicitant chaque section cisailée correspondent aux efforts transmissibles par chaque rivet.

#### 3.2 Pour les pièces à assembler

- matériau identique
- épaisseurs différentes éventuellement
- dans un souci de simplification les zones communes d'assemblages des pièces 1 et 2 sont de formes identiques

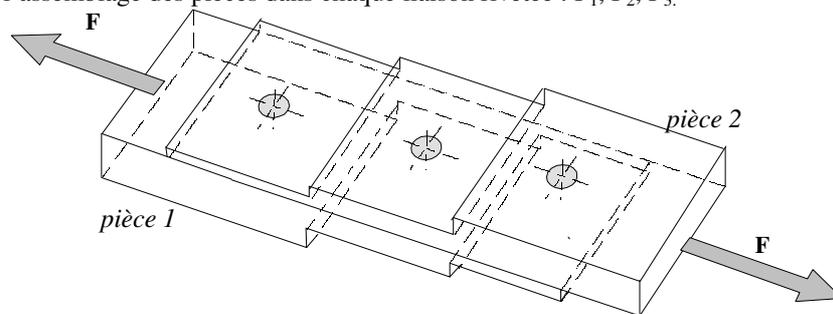
#### 3.3 Pour l'assemblage riveté réalisé

- liaisons parfaites (sauf pour §4.2 où l'adhérence entre tôles est nécessaire)
- entre pièce et rivet assemblage avec un jeu radial nul
- répartition de la pression de contact uniforme au contact radial alésage pièce-rivet

- expression de la pression de matage :  $p = \frac{F}{\text{surface projetée}}$

### 4 CAS D'UN ASSEMBLAGE RIVETE AVEC UNE SYMETRIE PLANE GEOMETRIQUE ET DES CONDITIONS AUX LIMITES

Il s'agit de calculer la contribution de l'effort à transmettre  $F$  (seul élément de réduction du torseur de cohésion : effort tranchant) par l'assemblage des pièces dans chaque liaison rivetée :  $F_1, F_2, F_3$ .

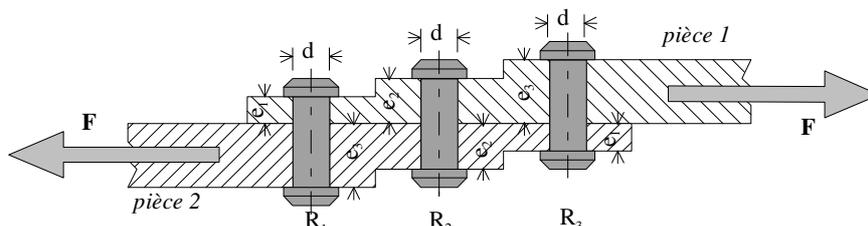


On propose trois modèles de calcul : iso-matage, iso-déformation, iso-cisaillement.

#### 4.1 Iso-matage au contact pièces et rivets

On suppose que ces efforts engendrent la même pression de matage (iso-matage) au contact entre les alésages des pièces et les corps cylindriques des rivets. On se place dans le cas où les voisinages des trous sont parfaitement plastiques.

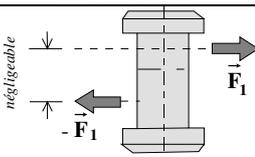
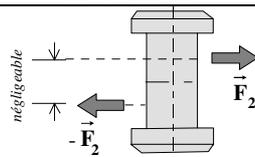
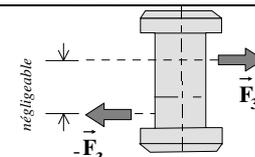
##### 4.1.1 Répartition des efforts induits par $F$ dans chaque liaison rivetée



##### 4.1.1.1 Pression de contact

Les pièces ayant des épaisseurs différentes, pour chaque liaison rivetée on ne considère que la valeur de la pression de contact la plus élevée.

Expressions de la pression de contact maximale dans chaque liaison rivetée

Rivet 1 isolé	Rivet 2 isolé	Rivet 3 isolé
 $p_1 = \frac{F_1}{d \times e_1}$ <p>ou <math>F_1 = p_1 \times d \times e_1</math></p>	 $p_2 = \frac{F_2}{d \times e_2}$ <p>ou <math>F_2 = p_2 \times d \times e_2</math></p>	 $p_3 = \frac{F_3}{d \times e_1}$ <p>ou <math>F_3 = p_3 \times d \times e_1</math></p>

La pression de contact dans chaque liaison rivetée étant identique, on a :

$$p = p_1 = p_2 = p_3$$

L'équilibre d'une pièce assemblée donne la relation :

$$F_1 + F_2 + F_3 = F$$

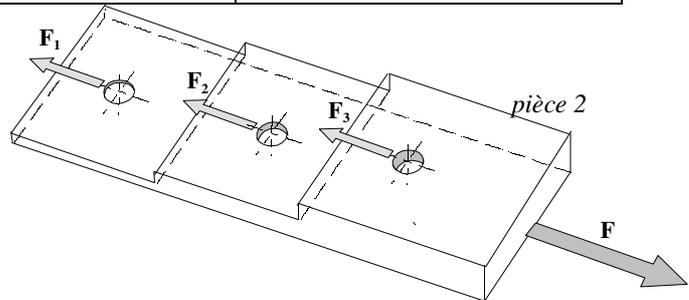
soit encore :  $(p_1 \times d \times e_1) + (p_2 \times d \times e_2) + (p_3 \times d \times e_1) = F$

en remplaçant par la pression de contact  $p$  :

$$p[2(d \times e_1) + d \times e_2] = F$$

d'où l'expression de la pression de contact d'iso-matage :

$$p = \frac{F}{d(2e_1 + e_2)}$$



#### 4.1.1.2 Efforts transmissibles par les rivets

Rivet 1 isolé	Rivet 2 isolé	Rivet 3 isolé
$F_1 = F \frac{e_1}{2e_1 + e_2}$	$F_2 = F \frac{e_2}{2e_1 + e_2}$	$F_3 = F \frac{e_1}{2e_1 + e_2}$

Les épaisseurs au droit des rivets 1 et 3 étant identiques :  $F_1 = F_3$ .

❑ *Remarque* : Dans le cas classique où les épaisseurs sont identiques ( $e_1 = e_2 = e_3 = e$ ), la pression de contact est égale à

$$p = \frac{F}{3(d \times e)} \text{ et les efforts transmissibles sont identiques } F_1 = F_2 = F_3 = \frac{F}{3}.$$

#### 4.1.2 Vérification de la tenue de l'assemblage riveté en comportement d'iso-matage

##### 4.1.2.1 Limite de l'étude

Il faut remarquer que ce type de comportement en iso-matage ne peut se produire que si les trous se déforment (ovalisation) jusqu'à ce que le domaine plastique de la déformation soit atteint (adaptation plastique pour matériau ductile) avant rupture à la traction des pièces assemblées ou rupture au cisaillement des rivets. Ce calcul est donc erroné si les contraintes sont faibles et les déformations demeurent dans le domaine élastique.

Dans ce cas de comportement d'iso-matage la pression de contact sur le rivet 1 n'est pas la même selon que l'on se place dans l'épaisseur  $e_1$  ou  $e_3$ , d'où des déformations d'ovalisation différentes entre des trous coaxiaux. Pour une meilleure répartition des efforts transmissibles dans les liaisons rivetées il est souhaitable que les pièces à assembler aient les mêmes épaisseurs (cas classique).

##### 4.1.2.2 Règles à appliquer

Connaissant la répartition d'effort dans chaque liaison rivetée, on peut calculer :

- la contrainte tangentielle moyenne et vérifier sur les rivets la condition de résistance (limite élastique au glissement  $R_{eg}$  du matériau rivet) ou de non rupture (résistance à la rupture  $R_g$  du matériau rivet).
- la pression de contact entre rivet et pièces assemblées et vérifier la condition de non matage (pression admissible  $p_{adm}$  de ce type d'assemblage et pour ce couple de matériaux).

##### 4.1.2.3 Valeurs aéronautiques usuelles de pressions de contact (en MPa) pour alliages légers

- rivetage avec adhérence dans le cas d'un double cisaillement :

$$p_{ad} = 1.15 R_e + 250 \text{ et } p_{ad, max} < 2 R_e$$

- rivetage avec adhérence dans le cas d'un simple cisaillement (et boulon ajustés et serrés) :

$$p_{ad} = 1.15 R_e + 150 \text{ et } p_{ad, max} < 1.65 R_e$$

- rivetage avec serrage faible des flancs (et boulons ordinaire, goupilles coniques) :

$$p_{ad} = 1.15 R_e$$

- axes ajustés, rotule, assemblage coulissant mais de mouvement sous charge :

$$p_{ad} = 0.88 R_e$$

- articulations à mouvement lent et alterné sous charge :

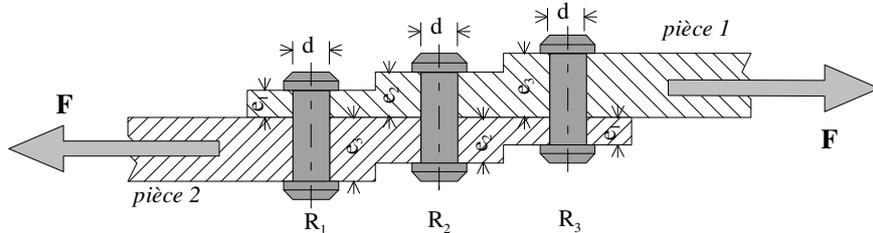
- graissage normal :  $p_{ad} = 0.5 R_e$

- graissage nul ou faible :  $p_{ad} = 0.25 R_e$

## 4.2 Iso-déformation des pièces assemblées

On suppose que ces efforts engendrent des déformations d'allongement (rappel  $\Delta l = \frac{F \times l}{E \times S}$ ) des pièces assemblées égales pour chaque tronçon situés entre deux liaisons rivetées consécutives.

### 4.2.1 Répartition des efforts induits par F dans chaque liaison rivetée

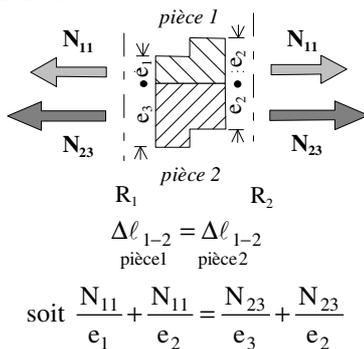


#### 4.2.1.1 Efforts transmissibles dans les pièce assemblées

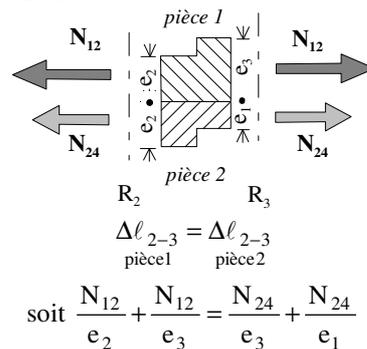
On isole les tronçons situés entre deux rivets consécutifs et sollicités par des efforts normaux  $N_{ij}$ . Pour simplifier on considère que les longueurs de pièces d'épaisseurs différentes du tronçon sont identiques.

L'hypothèse de déformation identique  $\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{\text{pièce 1}} = \left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{\text{pièce 2}}$  et  $\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{\text{pièce 1}} = \left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{\text{pièce 2}}$  permet d'écrire :

Tronçon 1-2 isolé :



Tronçon 2-3 isolé :



Si les épaisseurs  $e_1, e_2, e_3$  sont très voisines, on peut écrire, par souci de simplification, de nouvelles expressions prenant en compte l'épaisseur moyenne de chaque pièce :

Tronçon 1-2 isolé :

$$\frac{\Delta l_{1-2}}{\text{pièce 1}} = \frac{\Delta l_{1-2}}{\text{pièce 2}}$$

$$\text{soit } \frac{N_{11}}{(e_1 + e_2)/2} = \frac{N_{23}}{(e_3 + e_2)/2}$$

ou encore :

$$N_{11} \times (e_3 + e_2) = N_{23} \times (e_1 + e_2) \quad (a)$$

Tronçon 2-3 isolé :

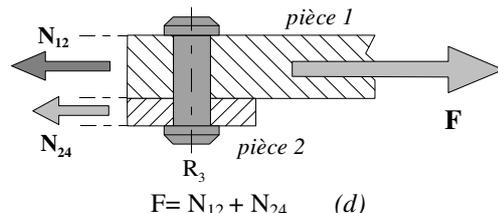
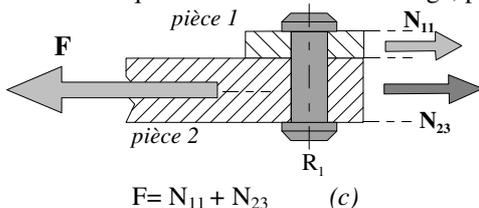
$$\frac{\Delta l_{2-3}}{\text{pièce 1}} = \frac{\Delta l_{2-3}}{\text{pièce 2}}$$

$$\text{soit } \frac{N_{12}}{(e_2 + e_3)/2} = \frac{N_{24}}{(e_2 + e_1)/2}$$

ou encore :

$$N_{12} \times (e_2 + e_1) = N_{24} \times (e_2 + e_3) \quad (b)$$

L'équilibre de chaque extrémité de l'assemblage, permet d'écrire :

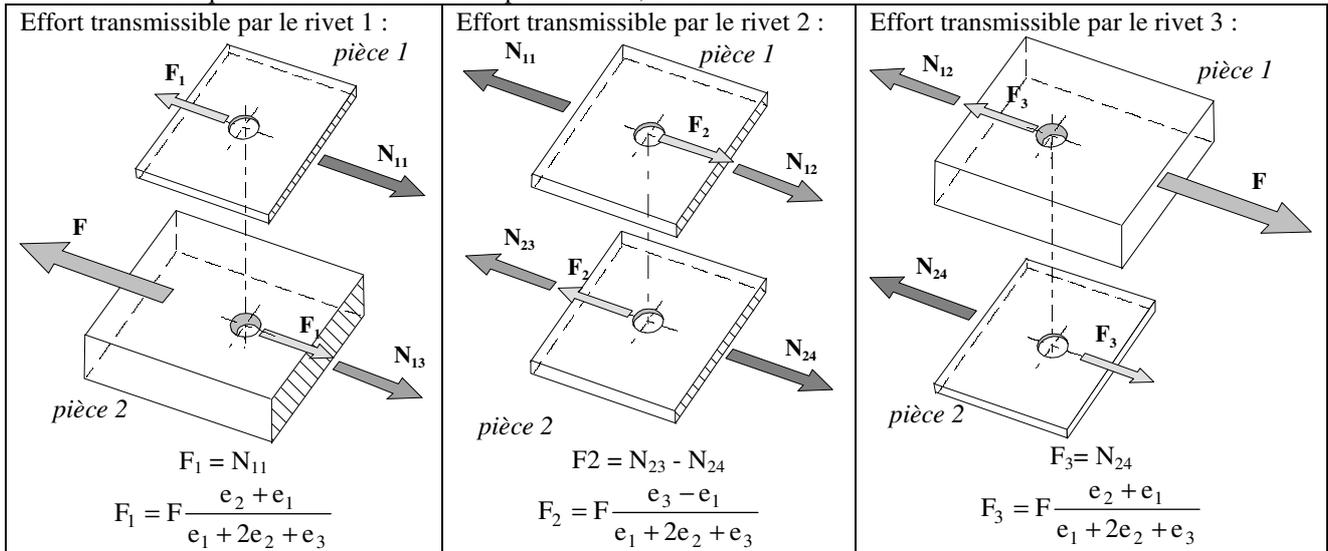


La résolution du système d'équations (a), (b), (c), (d) donne :

$$N_{12} = N_{23} = F \frac{e_2 + e_3}{e_1 + 2e_2 + e_3} \quad \text{et} \quad N_{11} = N_{24} = F \frac{e_2 + e_1}{e_1 + 2e_2 + e_3}$$

#### 4.2.1.2 Efforts transmissibles par les rivets

En réalisant les équilibres des extrémités des pièces 1 et 2, on trouve :



□ Remarque :

Dans le cas classique où les épaisseurs sont identiques ( $e_1 = e_2 = e_3 = e$ ), les efforts transmissibles sont égaux à  $F_1 = F_3 = \frac{F}{2}$  et  $F_2 = 0$

#### 4.2.2 Vérification de la tenue de l'assemblage riveté en comportement d'iso-déformation

##### 4.2.2.1 Limite de l'étude

Cette hypothèse de calcul est surtout valable tant que l'on reste dans le **domaine élastique**. Cette méthode est retenue essentiellement pour faire des calculs de répartition de charge en **fatigue**.

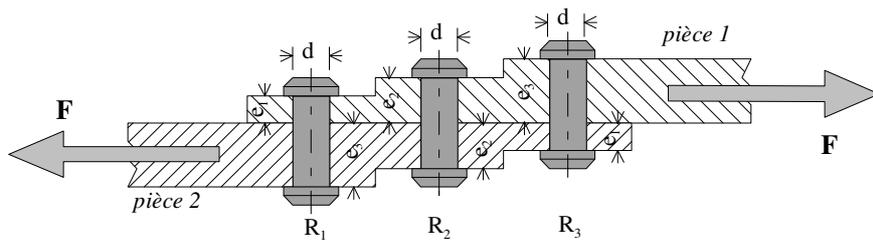
##### 4.2.2.2 Règles à appliquer

Connaissant les efforts transmissibles par chaque rivet on pourra vérifier la condition de non matage des pièces et la condition de résistance (ou de non rupture) au cisaillement des rivets.

#### 4.3 Iso-cisaillement des sections des corps de rivets

On suppose que l'effort F transmissible par l'assemblage riveté est repris de façon identique par chaque rivet. On se place dans le cas où chaque rivet est considéré comme plastique.

##### 4.3.1 Répartition des efforts induits par F dans chaque liaison rivetée

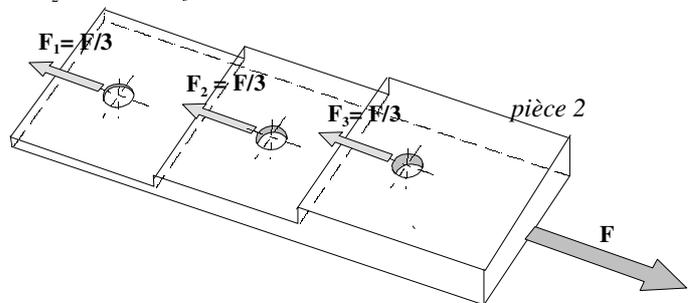


L'hypothèse de calcul en iso-cisaillement (contrainte tangentielle identique dans chaque section de rivet identique) s'applique immédiatement pour des rivets identiques et l'on écrit :

$$F_1 = F_2 = F_3 = \frac{F}{3}$$

Si les rivets sont de diamètres différents :

$$F_i = F \frac{d_i^2}{\sum d_i^2}$$



### 4.3.2 Vérification de la tenue de l'assemblage riveté en comportement d'iso-cisaillement

#### 4.3.2.1 Limite de l'étude

Cette condition de répartition de l'effort transmissible par un assemblage riveté est rarement retenue en structure aéronautique, elle traduit simplement une contribution de l'effort global F en fonction de l'aire des sections de chaque rivet (si les rivets sont de diamètres différents). Elle ne tient pas compte de l'environnement de la liaison (épaisseurs des pièces assemblées). En structure aéronautique les assemblages rivetés sont souvent réalisés à partir de tôles minces et la condition de non matage est prépondérante pour éviter la ruine de l'assemblage.

#### 4.3.2.2 Règles à appliquer

Connaissant les efforts transmissibles par chaque rivet on pourra vérifier la condition de non matage des pièces et la condition de résistance (ou de non rupture) au cisaillement des rivets.

## 4.4 Application numérique et étude comparative

### 4.4.1 Données

- effort global F = 8000 N ; diamètre des rivets : d = 6 mm ; épaisseurs des pièces : e<sub>1</sub> = 3 mm, e<sub>2</sub> = 6 mm ; e<sub>3</sub> = 9 mm

### 4.4.2 Efforts transmissibles

		F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
<b>iso-matage</b>	épaisseurs différentes	<b>2000</b> (25%)	<b>4000</b> (50%)	<b>2000</b> (25%)
	épaisseurs identiques	<b>2666.6</b> (33%)	<b>2666.6</b> (33%)	<b>2666.6</b> (33%)
<b>iso-déformation</b>	épaisseurs différentes	<b>3076</b> (38.5%)	<b>1848</b> (23%)	<b>3076</b> (38.5%)
	épaisseur moyenne	<b>3000</b> (37.5%)	<b>2000</b> (25%)	<b>3000</b> (37.5%)
	épaisseurs identiques	<b>4000</b> (50%)	<b>0</b>	<b>4000</b> (50%)
<b>iso-cisaillement</b>		<b>2666.6</b> (33%)	<b>2666.6</b> (33%)	<b>2666.6</b> (33%)

#### ☐ Remarques :

- ♦ Dans le cas du comportement en iso-déformation si l'on simplifie les calculs par l'utilisation d'une épaisseur moyenne, on ne modifie que légèrement les résultats.
- ♦ Pour un assemblage de pièces d'épaisseurs identiques par des rivets de diamètres identiques les efforts transmissibles ont une répartition identique pour les comportements en iso-matage et en iso-cisaillement.

### 4.4.3 Caractéristiques des composants et comportements

	pièces assemblées		rivets	
	matériau	épaisseurs	matériau	diamètre
<b>iso-matage</b>				
<b>iso-déformation</b>				
<b>iso-cisaillement</b>				

## 5 CAS D'UN ASSEMBLAGE RIVETE QUELCONQUE

On rappelle les éléments réduction du torseur de cohésion dans la jonction rivetée :

$$\{Coh_{1/2}\}_G = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{1/2} = T_y \vec{y} + T_z \vec{z} \\ \vec{M}_{G(1/2)} = M_x \vec{x} \end{array} \right\}_{G,r}$$

### 5.1 Répartition des efforts induits par le torseur de cohésion dans chaque liaison rivetée

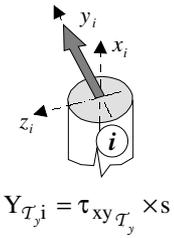
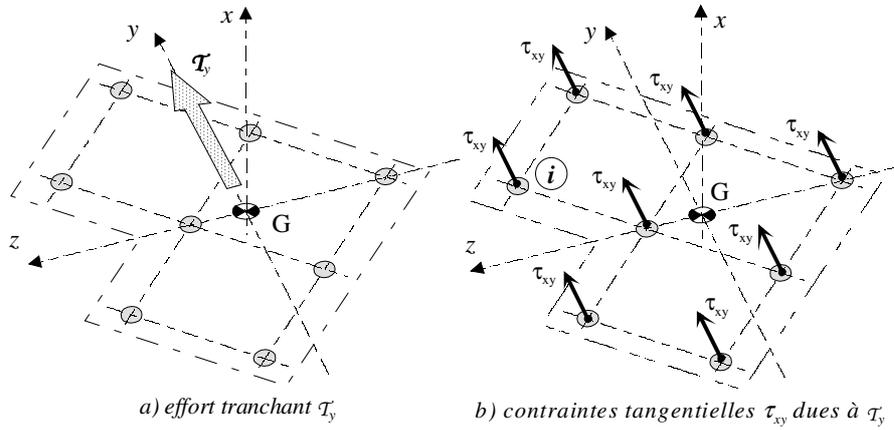
On suppose ici que seuls les rivets de rivets travaillent.

#### 5.1.1 Données relatives à la jonction rivetée boulonnée équivalente

G centre géométrique des "n" sections :  $\sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n z_i = 0$  ;

$\vec{y}$  et  $\vec{z}$  axes quadratiques principaux :  $\sum_{i=1}^n y_i \times z_i = 0$  et  $I_y = s \times \sum_{i=1}^n z_i^2$  ;  $I_z = s \times \sum_{i=1}^n y_i^2$  ;  $I_0 = I_y + I_z$

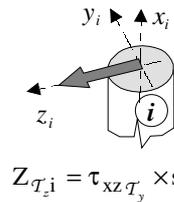
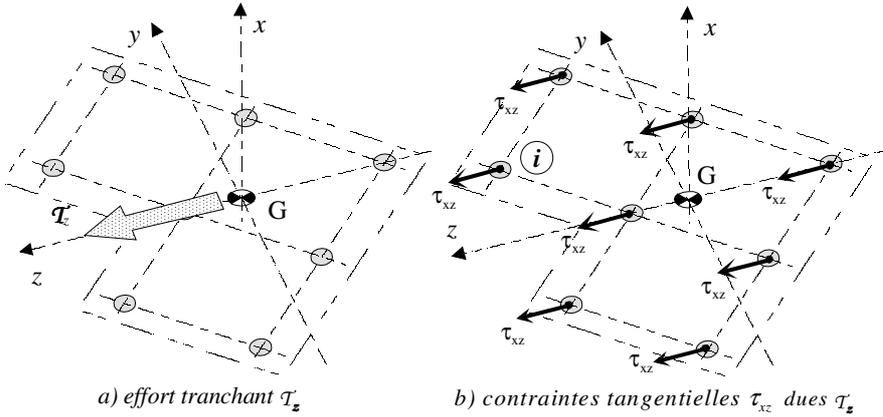
#### 5.1.2 Effort tranchant $T_y$ et contraintes engendrées :



c) effort tangentiel de cohésion dans une fixation  $i$

$$Y_{T_y i} = \tau_{xy} T_y \times s$$

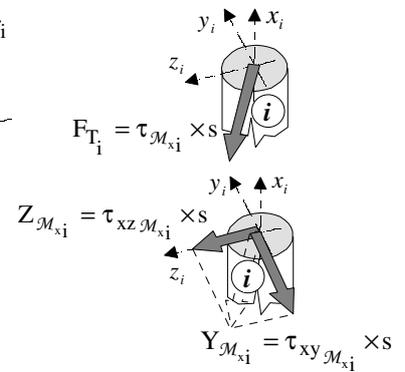
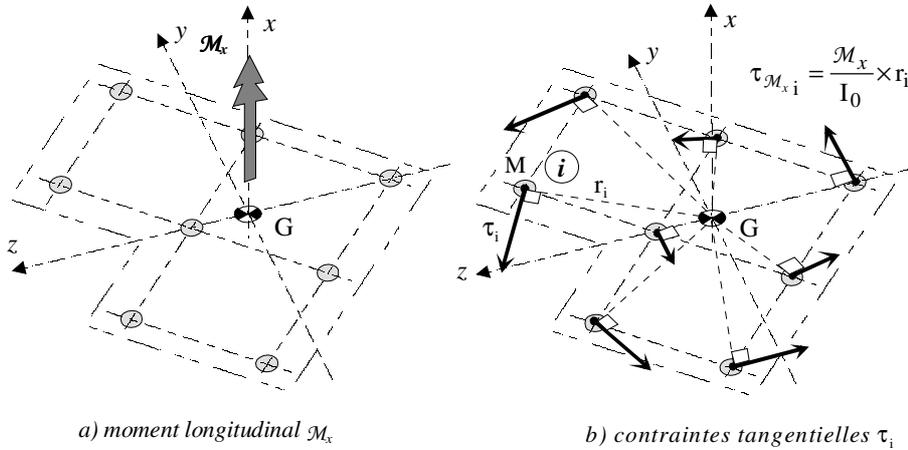
### 5.1.3 Effort tranchant $T_z$ et contraintes engendrées :



c) effort tangentiel de cohésion dans une fixation  $i$

$$Z_{T_z i} = \tau_{xz} T_z \times s$$

### 5.1.4 Moment de torsion $M_x$ et contraintes engendrées :



c) efforts tangentiels de cohésion dans une fixation  $i$

$$F_{T_i} = \tau_{M_{x_i}} \times s$$

$$Z_{M_{x_i}} = \tau_{xz} M_{x_i} \times s$$

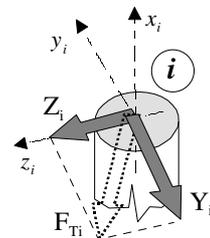
$$Y_{M_{x_i}} = \tau_{xy} M_{x_i} \times s$$

### 5.1.5 Composantes des efforts induits dans la section d'un rivet

♦ composantes de l'effort tangentiel :

$$Y_i = \frac{T_y}{n} - M_x \times \frac{z_i}{\sum_{i=1}^n (y_i^2 + z_i^2)} ; Z_i = \frac{T_z}{n} + M_x \times \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n (y_i^2 + z_i^2)}$$

♦ effort tangentiel total :  $F_{T_i} = \sqrt{Y_i^2 + Z_i^2}$



## 5.2 Vérification de la tenue de l'assemblage riveté quelconque

### 5.2.1 Pièces assemblées infiniment rigides par rapport aux rivets

Les contraintes tangentielles dans les sections des rivets sont directement issues des expressions des efforts induits précédentes, on précisera dans quelles conditions elles sont calculées :

- les contraintes tangentielles engendrées par les efforts tranchants : comportement d'iso-cisaillement
- les contraintes tangentielles engendrées par le moment de torsion : distribution des contraintes proportionnelles à la distance  $r_i$

### 5.2.2 Pièces assemblées très souples par rapport aux rivets

(voir airbus-socata)

Ici on suppose que la contrainte de cisaillement  $\tau_{M_x}$  engendrée par le moment de torsion est constante dans toutes les sections cisailées. L'effort tangentiel induit dans un rivet s'écrit alors :

$$F_{Ti} = \tau_{M_x} \times s .$$

Le moment de torsion peut s'exprimer alors :

$$M_x = \tau_{M_x} \sum (s \times r_i) .$$

L'expression  $\sum (s \times r_i)$  représente le moment statique polaire, notée  $W_G$ , de l'ensemble des sections cisailées par rapport au centre géométrique G de la jonction rivetée.

La contrainte tangentielle engendrée pour ce cas d'étude s'écrit alors :

$$\tau_{M_x} = \frac{M_x}{W_G}$$

### 5.2.3 Limite de l'étude

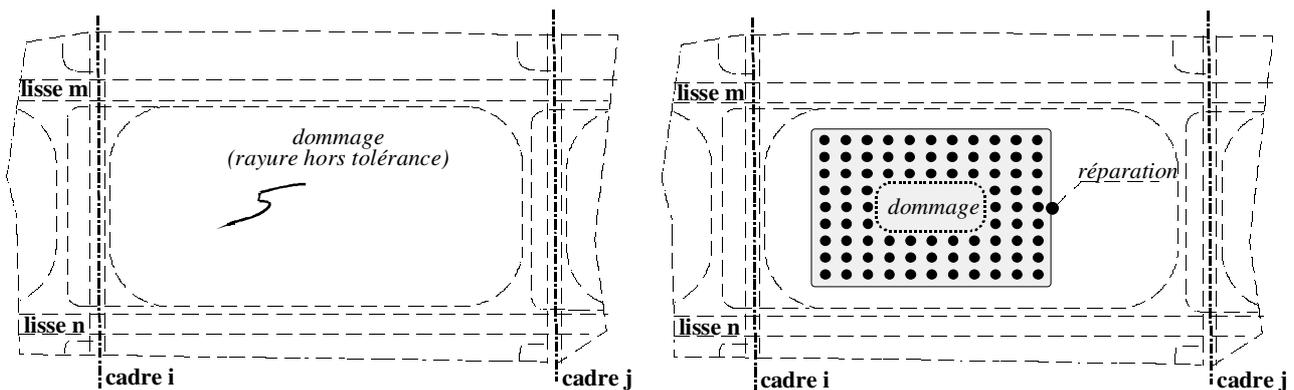
La première hypothèse (cf. 5.2.1) correspond à la construction métallique rivetée usuelle.

La seconde hypothèse (cf.5.2.2) est valable dans le domaine **plastique**. Elle est vérifiée par les essais statiques à la rupture.

## 6 CAS D'UNE REPARATION RIVETEE SUR UN FUSELAGE AVION

Un panneau du fuselage d'épaisseur  $e_p = 1.6$  a subi un dommage qui nécessite dans la zone concernée une réparation locale par rivetage (rivets de diamètre  $d = 4.8$ ) d'une plaque d'épaisseur  $e_d = 1.8$  appelée doubleur. Trois lignes de rivets au pas de 20 mm entourent ce dommage.

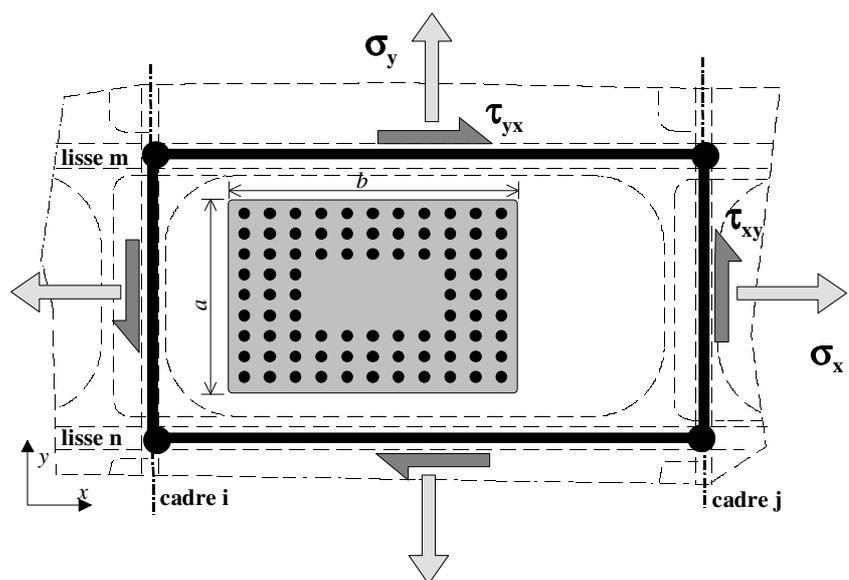
Il s'agit alors de vérifier que la tenue de cet assemblage est compatible avec la réglementation.



### 6.1 Etat de contraintes dans le panneau

A partir d'une modélisation du fuselage en éléments finis de plaque on récupère l'état des contraintes sur ce panneau incluant la réparation. A l'échelle de l'avion un panneau peut correspondre à un élément de plaque. Il s'agit ici d'un état plan de contraintes (membrane) caractérisé par la matrice (MPa) :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{bmatrix}_{xy} = \begin{bmatrix} 90.8 & 31 \\ 31 & 19.6 \end{bmatrix}_{xy}$$



### 6.2 Calculs des efforts dans le panneau transférés au doubleur

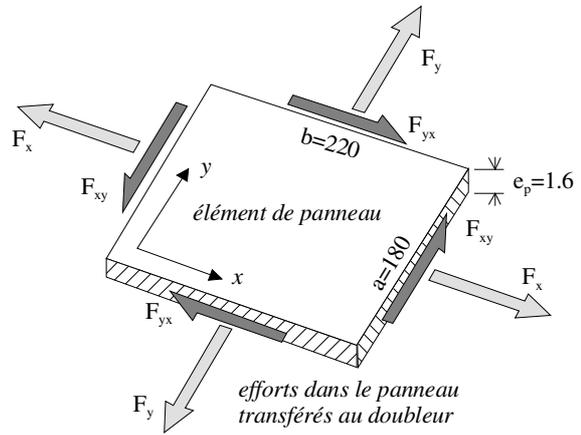
L'état des contraintes relevé est issu d'efforts transmissibles normaux et tangentiels situés dans le plan du panneau. Dans la zone à réparer ces efforts doivent être transférés intégralement au doubleur.

$$F_x = \sigma_x \times a \times e_p = 90.8 \times 1.6 \times 180 = 26150.4N$$

$$F_y = \sigma_y \times b \times e_p = 19.6 \times 1.6 \times 220 = 6899.2N$$

$$F_{xy} = \sigma_{xy} \times a \times e_p = 31 \times 1.6 \times 180 = 8928N$$

$$F_{yx} = \sigma_{yx} \times b \times e_p = 31 \times 1.6 \times 180 = 8928N$$



### 6.3 Calcul des efforts transférés à chaque rivet

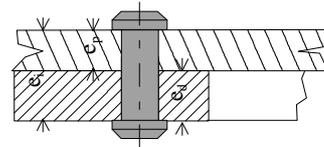
#### 6.3.1 Caractéristiques de l'assemblage

- nombre de rivets identiques soumis à :

effort normal $F_x$ : $n_x = 39$	effort normal $F_y$ : $n_y = 39$	effort tangentiel $F_{xy}$ : $n_{xy} = 27$	effort tangentiel $F_{yx}$ : $n_{yx} = 33$

- hauteur sous têtes du rivet i (cette hauteur peut être variable sur des panneaux usinés d'épaisseurs variables)  $e_i = 1.6 + 18$

- aire section rivet i :  $s_i = \frac{\pi \times 4.8^2}{4}$



#### 6.3.2 Composantes de l'effort transféré par rivet

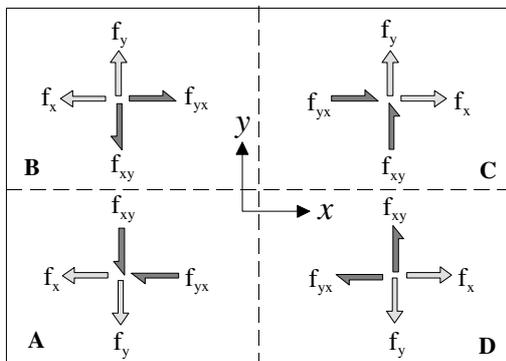
- hypothèse iso-matage

$f_{xi} = \frac{F_x \times e_i \times d_i}{\sum e_i \times d_i} = \frac{F_x}{n_x}$ $f_{xi} = 670N$	$f_{yi} = \frac{F_y \times e_i \times d_i}{\sum e_i \times d_i} = \frac{F_y}{n_y}$ $f_{yi} = 176N$	$f_{xyi} = \frac{F_{xy} \times e_i \times d_i}{\sum e_i \times d_i} = \frac{F_{xy}}{n_{xy}}$ $f_{xyi} = 330N$	$f_{yxi} = \frac{F_{yx} \times e_i \times d_i}{\sum e_i \times d_i} = \frac{F_{yx}}{n_{yx}}$ $f_{yxi} = 330N$
---	---	--	--

- hypothèse iso-cisaillement

$f_{xi} = \frac{F_x \times s_i}{\sum s_i} = \frac{F_x}{n_x}$ $f_{xi} = 670N$	$f_{yi} = \frac{F_y \times s_i}{\sum s_i} = \frac{F_y}{n_y}$ $f_{yi} = 176N$	$f_{xyi} = \frac{F_{xy} \times s_i}{\sum s_i} = \frac{F_{xy}}{n_{xy}}$ $f_{xyi} = 330N$	$f_{yxi} = \frac{F_{yx} \times s_i}{\sum s_i} = \frac{F_{yx}}{n_{yx}}$ $f_{yxi} = 330N$
---	---	--	--

#### 6.3.3 Effort résultant transféré par rivet



A partir de la localisation des rivets sur le doubleur et en combinant les composantes on obtient :

- un effort résultant maxi dans les zones A et C :

$$f_{maxi} = \sqrt{(f_x + f_{yx})^2 + (f_y + f_{xy})^2}$$

$$f_{maxi} = 1120N$$

- un effort résultant mini dans les zones B et D :

$$f_{mini} = \sqrt{(f_x - f_{yx})^2 + (f_y - f_{xy})^2}$$

$$f_{mini} = 373N$$

### 6.4 Vérification de la tenue des rivets au comportement en iso-cisaillement

$$\tau = \frac{f_{\max i}}{\pi \times d^2} < R_{eg} \text{ soit } \tau = \frac{1120}{\pi \times 4.8^2} = 62 \text{MPa} \text{ et } R_{eg} = 260 \text{MPa}$$

### 6.5 Vérification de la tenue du panneau et du doubleur au comportement en iso-matage dans les alésages

$$p_{\text{panneau}} = \frac{f_{\max i}}{e_p \times d} < p_{\text{adm pan}} \text{ soit } p_{\text{panneau}} = \frac{1120}{1.6 \times 4.8} = 146 \text{MPa} \text{ et } p_{\text{adm pan}} = 600 \text{MPa}$$

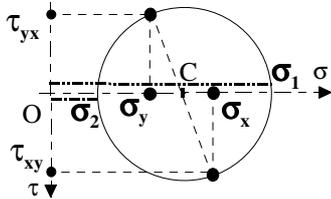
$$p_{\text{doubleur}} = \frac{f_{\max i}}{e_d \times d} < p_{\text{adm dou}} \text{ soit } p_{\text{doubleur}} = \frac{1120}{1.8 \times 4.8} = 129 \text{MPa} \text{ et } p_{\text{adm dou}} = 600 \text{MPa}$$

### 6.6 Vérification de la tenue du panneau et du doubleur à la non rupture en traction

A partir de la matrice des contraintes  $\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{bmatrix}_{xy}$  exprimée dans le repère local  $xy$ , on peut obtenir la matrice des

contraintes principales  $\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{bmatrix}_{I2} = \begin{bmatrix} 102 & 0 \\ 0 & 8 \end{bmatrix}_{I2}$  exprimée dans le repère principal  $I2$ .

On rappelle les relations et la construction du cercle de Mohr utilisables.



$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Pour faire un calcul pénalisant pour le comportement de l'assemblage, on considère que la contrainte normale principale maximale « brute »,  $\sigma_1 \text{ brute}$ , s'applique sur une tranche du panneau non percée. La contrainte normale « nette » est la celle qui s'applique sur la même tranche de panneau (ou de doubleur) mais avec des trous pour les rivets disposés sur une ligne à pas constant. Lorsque cette contrainte normale atteint la résistance à la rupture on reproduit l'effet timbre poste.



On écrit l'égalité des flux d'effort :

- entre la section « brute » et la section « nette » dans le panneau :

$$\sigma_{\text{nette pan}} \times (\text{pas} - d)e_p = \sigma_1 \text{ brute} \times (\text{pas} \times e_p) \text{ soit } \sigma_{\text{nette pan}} = \frac{20 \times 1.6}{(20 - 4.8)1.6} \times 102 = 132 \text{MPa}$$

- entre la section « nette » du doubleur et la section « nette » dans le panneau :

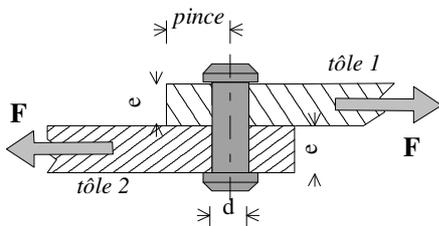
$$\sigma_{\text{nette dou}} \times (\text{pas} - d)e_d = \sigma_{\text{nette pan}} \times (\text{pas} - d)e_p \text{ soit } \sigma_{\text{nette dou}} = \frac{1.6}{1.8} \times 132 = 117 \text{MPa}$$

On vérifie alors que :  $\sigma_{\text{nette pan}} < R_{r \text{ pan}}$  et  $\sigma_{\text{nette dou}} < R_{r \text{ dou}}$ , (avec  $R_{r \text{ pan}} = R_{r \text{ dou}} = 440 \text{MPa}$ )

**Cette valeur  $\sigma_1 \text{ brute}$  de 102 MPa n'est pas celle du doc airbus-socata ??**

## 7 QUELQUES REGLES PRATIQUES CONDITIONNEES PAR LES SOLLICITATIONS

### 7.1 Données



matériaux :

- résistance à la rupture à la traction du rivet :  $R_{r \text{ rivet}}$
- résistance à la rupture au cisaillement du rivet :  $R_{rg \text{ rivet}}$
- résistance à la rupture à la traction de la tôle :  $R_{rg \text{ tôle}}$
- pression de contact admissible au contact rivet- tôle :  $p_{\text{adm}}$

cas particulier :

- matériau tôle et matériau rivet identique :  $R_{rg} \cong 0.6 R_r$
- rivet monté serré :  $p_{\text{adm}} = 1.5 R_r$

### 7.2 Les rivets

#### 7.2.1 Condition de non rupture au cisaillement du rivet

$$\tau_{\text{rivet}} = \frac{F}{\pi \times d^2} < R_{rg \text{ rivet}} \text{ soit encore } \frac{F}{\pi \times d^2} < 0.6 R_r$$

l'effort transmissible maxi F peut s'exprimer :  $F = \frac{\pi \times d^2}{4} 0.6 \times R_r$

### 7.2.2 Condition de non matage du corps du rivet

$$p = \frac{F}{e \times d} < p_{adm} \text{ soit encore } \frac{F}{e \times d} < 1.5 R_r$$

l'effort transmissible maxi F peut s'exprimer :  $F = e \times d \times 1.5 \times R_r$

### 7.2.3 Disposition usuelle à respecter

L'égalité des efforts transmissibles maxi permet d'écrire  $\frac{\pi \times d^2}{4} 0.6 \times R_r = e \times d \times 1.5 \times R_r$

d'où la règle de conception respectant les deux conditions :  $\frac{d}{e} < 3.2$

## 7.3 Les tôles assemblées

### 7.3.1 Condition de non rupture en traction de la tôle

$$\sigma_{tôle} = \frac{F}{(pas - d)e} < R_{r \text{ tôle}}$$

l'effort transmissible maxi F peut s'exprimer :  $F = (pas - d) \times e \times R_r$

### 7.3.2 Condition de non matage des alésages des trous dans la tôle

$$p = \frac{F}{e \times d} < p_{adm} \text{ soit encore } \frac{F}{e \times d} < 1.5 R_r$$

l'effort transmissible maxi F peut s'exprimer :  $F = e \times d \times 1.5 \times R_r$

### 7.3.3 Disposition usuelle à respecter

L'égalité des efforts transmissibles maxi permet d'écrire :  $(pas - d) \times e \times R_r = e \times d \times 1.5 \times R_r$

d'où la règle de conception respectant les deux conditions :  $pas = 2.5d$

soit en pratique :  $3 < pas < 5$  (pour garantir l'étanchéité statique)

## 7.4 La pince sur la tôle

### 7.4.1 Condition de non rupture en cisaillement de la pince sur la tôle

$$\tau_{pince \text{ tôle}} = \frac{F}{2 \times pince \times e} < R_{rg \text{ tôle}} \text{ soit encore } \frac{F}{2 \times pince \times e} < 0.6 R_r$$

l'effort transmissible maxi F peut s'exprimer :  $F = 2 \times pince \times e \times 0.6 \times R_r$

### 7.4.2 Condition de non matage des alésages des trous dans la tôle

$$p = \frac{F}{e \times d} < p_{adm} \text{ soit encore } \frac{F}{e \times d} < 1.5 R_r$$

l'effort transmissible maxi F peut s'exprimer :  $F = e \times d \times 1.5 \times R_r$

### 7.4.3 Disposition usuelle à respecter

L'égalité des efforts transmissibles maxi permet d'écrire :  $2 \times pince \times e \times 0.6 \times R_r = e \times d \times 1.5 \times R_r$

d'où la règle de conception respectant les deux conditions :  $\frac{pince}{d} > 1.5$

## 8 MODELISATION D'UN ASSEMBLAGE RIVETE PAR ELEMENTS FINIS

Hypothèse : non prise en compte de la tension de pose des rivets et donc de l'adhérence entre les pièces en contact.

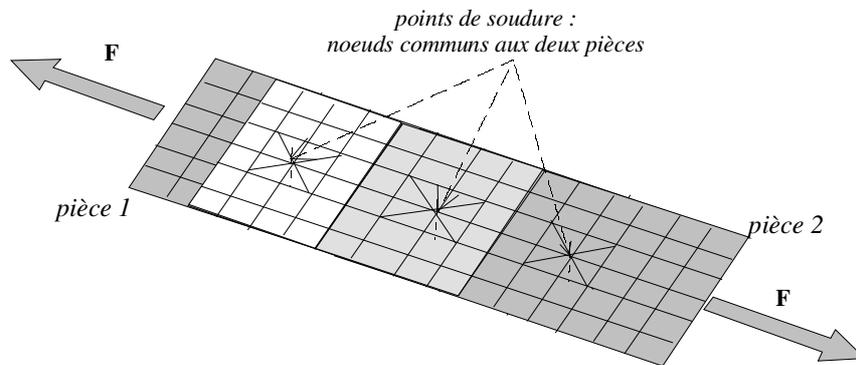
### 8.1 Modélisation en éléments de plaques

Les deux pièces sont modélisées par leur surface moyenne en éléments de plaques. Les pièces sont situées dans le même plan de sollicitation, pas d'effet de flexion des plaques. Les liaisons des pièces par les rivets sont modélisés par des « points de soudure » (nœuds communs entre les pièces pour simuler les liaisons réalisées par les rivets).

Il n'y a pas de prise en compte de la raideur des rivets, ils sont considérés comme infiniment rigides

Cette modélisation permet de trouver rapidement la distribution des efforts au droit de chaque rivet.

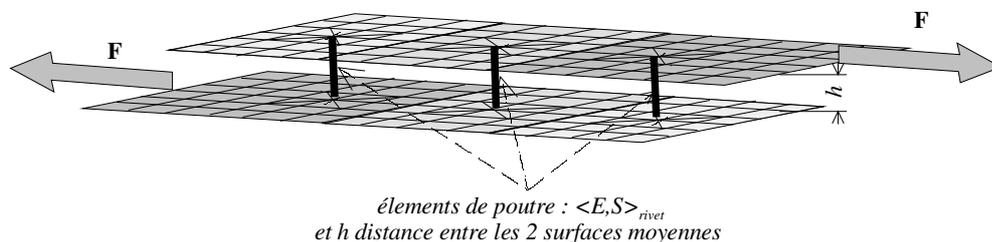
Si la structure est auto-équilibrée seule une mise en position isostatique est nécessaire (6 ddl bloqués).



### 8.2 Modélisation en éléments de plaques et de poutres

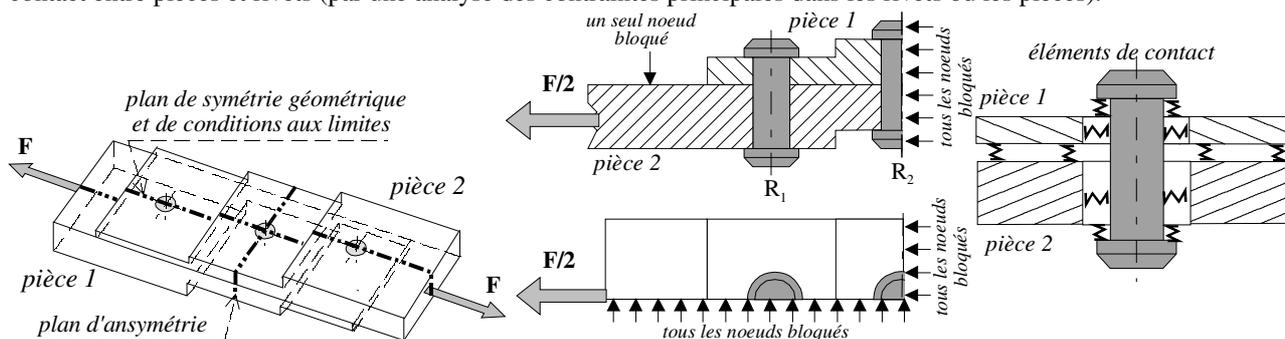
Les deux pièces sont modélisées par leur surface moyenne en éléments de plaques. Les pièces étant situées dans deux plans parallèles, l'effet de flexion des plaques est pris en compte. Les liaisons des pièces avec les rivets sont modélisées par des poutres encastrées entre les deux pièces de caractéristiques de sections identiques à celles de rivets pour simuler la liaison réalisée par les rivets. Si la structure est auto-équilibrée seule une mise en position isostatique est nécessaire (6 ddl bloqués).

Cette modélisation permet de trouver une distribution des efforts au droit de chaque rivet en prenant en compte les déformations des rivets.



### 8.3 Modélisation en éléments solides et éléments de contact

On modélise la liaison rivetée telle qu'elle est, c'est-à-dire avec des éléments solides pour les pièces et les rivets. Pour prendre en compte l'interaction des pièces (appui plan) et les interactions des rivets et de leurs têtes sur les pièces, on insère entre les surfaces en contact des éléments de contact. Les rivets ont un mouvement d'ensemble de rotation autour de leur axe de révolution. Pour remédier à ce problème de modélisation, il est préférable de modéliser des tranches de l'assemblage en prenant en compte les symétries géométriques et de conditions aux limites (cf. figure suivante relative à cette modélisation). Cette modélisation permet de trouver une distribution des efforts très réaliste au droit de chaque rivet et de connaître aussi l'état de contraintes dans les rivets ainsi qu'une estimation des pressions de contact entre pièces et rivets (par une analyse des contraintes principales dans les rivets ou les pièces).



Une étude locale sur la souplesse de l'assemblage associée à une étude de sensibilité sur la nature de l'ajustement (léger jeu, jeu nul, frettage) entre corps cylindrique du rivet et alésage des pièces peuvent être réalisées.

