

FERRURE AERONAUTIQUE

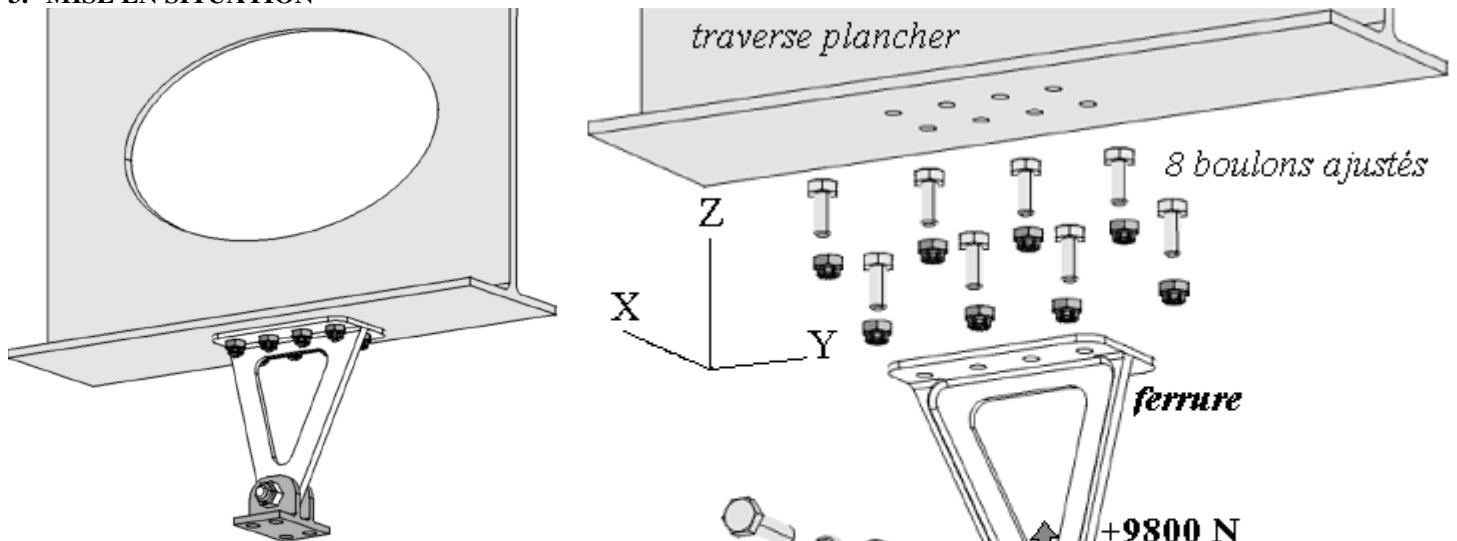
1. PRE REQUIS

- connaissances de base sur le comportement élastique des structures et des liaisons structurales
- initiation à la pratique de la modélisation des structures par éléments finis.

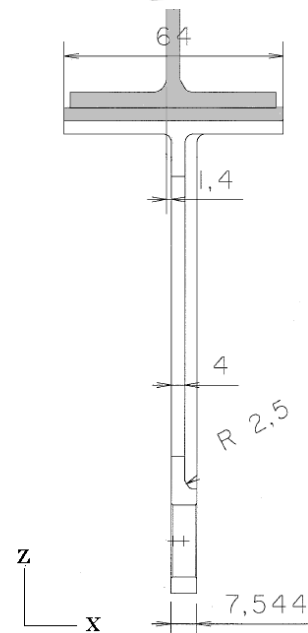
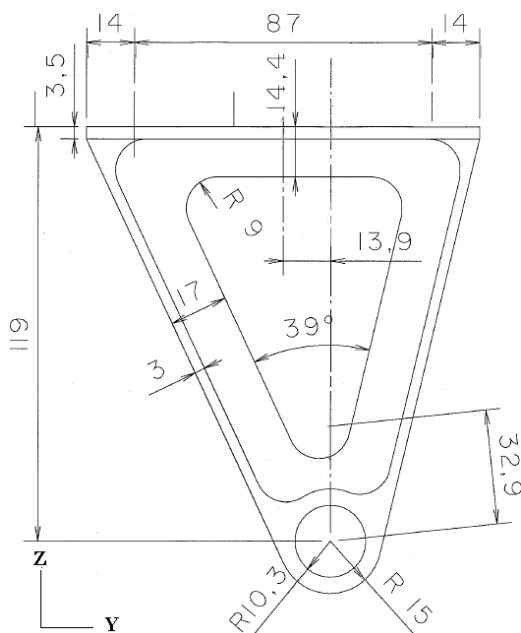
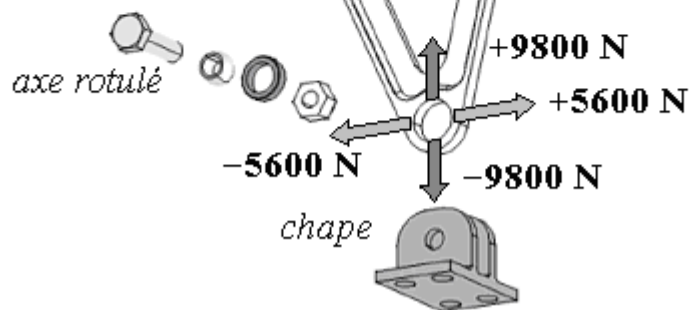
2. OBJECTIFS

- sensibilisation aux différents types de modélisations des structures par éléments finis afin d'étudier leur comportement élastique d'une ferrure aéronautique participant la suspension de racks électroniques dans la soute d'un avion et soumise à plusieurs cas de charges.
- recalage des résultats obtenus par des moyens numériques avec ceux obtenus par des calculs manuels élémentaires.

3. MISE EN SITUATION



matériau ferrure :
alliage d'aluminium norme ASNA3050
série 7000 ; 7175, état thermique T7351
Rr : 435 MPa
Re traction : 365 MPa
Re compression : 370 MPa
Module d'Young en traction : 71 000 MPa



4. RAPPELS DES ETAPES POUR MODELISER UNE STRUCTURE

A partir d'un cahier des charges de dimensionnement....

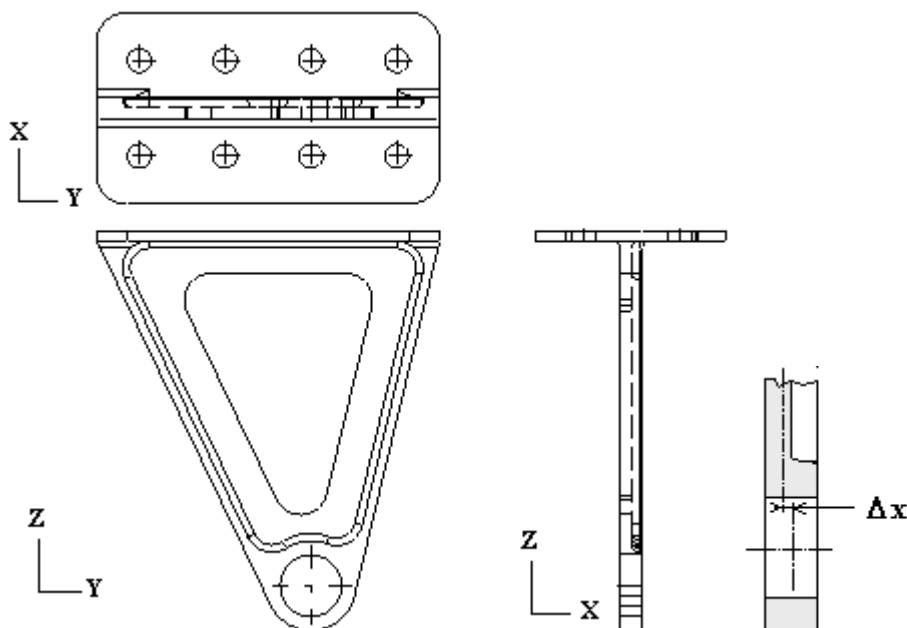
1°- étape	élaboration du modèle géométrique de la structure : - implantation du repère global et choix des unités - les modélisations possibles :		
	<i>modèle géométrique</i>	<i>modèle éléments finis</i>	<i>comportement élastique</i>
	solide (maillage automatique)	éléments solides	état quelconque des contraintes
	surfacique (structure modélisée par les surfaces moyennes des tôles-plaques)	éléments plaques	théorie des plaques
	filaire (structure modélisée par les lignes moyennes des profilés)	éléments poutres	théorie des poutres
2°- étape	entrée des données du modèle éléments finis (pré-traitement): - propriétés du maillage (densité, performances des éléments, densité pour un maillage local...) - propriétés des matériaux - pour les éléments poutres : propriétés des sections et repères locaux (axes centraux principaux quadratiques) - pour les éléments plaques : épaisseurs - conditions aux limites : - aux liaisons externes (quels ddl bloquer pour que la structure soit correctement appuyée ?) - aux chargements (forces et moments)		
	calcul : - résolution du système linéaire relatif à la relation de comportement : $\{F\} = [K]*\{d\}$ pour calculer les efforts et déplacements inconnus {F} : matrice de colonne des "n" chargements nodaux (connus et inconnus) {d} : matrice de colonne des "n" déplacements nodaux (connus et inconnus) [K] : matrice de raideur de dimension "n*n" de la structure carrée et symétrique		
3°- étape	analyse et exploitation des résultats (post-traitement) : - vérification de la masse - vérification de l'équilibre général - analyse des torseurs des actions mécaniques (repère global) : <i>pour dimensionner des liaisons structurales bâti-structure</i> - analyse en déplacements nodaux (repère global) : <i>pour vérifier la condition de rigidité</i> - analyse en contraintes (repères locaux) : <i>pour vérifier la condition de résistance</i> - exploitation des torseurs de cohésion (repères locaux) pour les éléments poutres : <i>pour dimensionner des liaisons structurales entre les profilés constituant la structure</i> - vérification de la cohérence des résultats par des calculs analytiques manuels élémentaires		

5. ELABORATION DES MODELES DE CALCUL

5.1 Préliminaire : appréhender le comportement de la structure avant le calcul

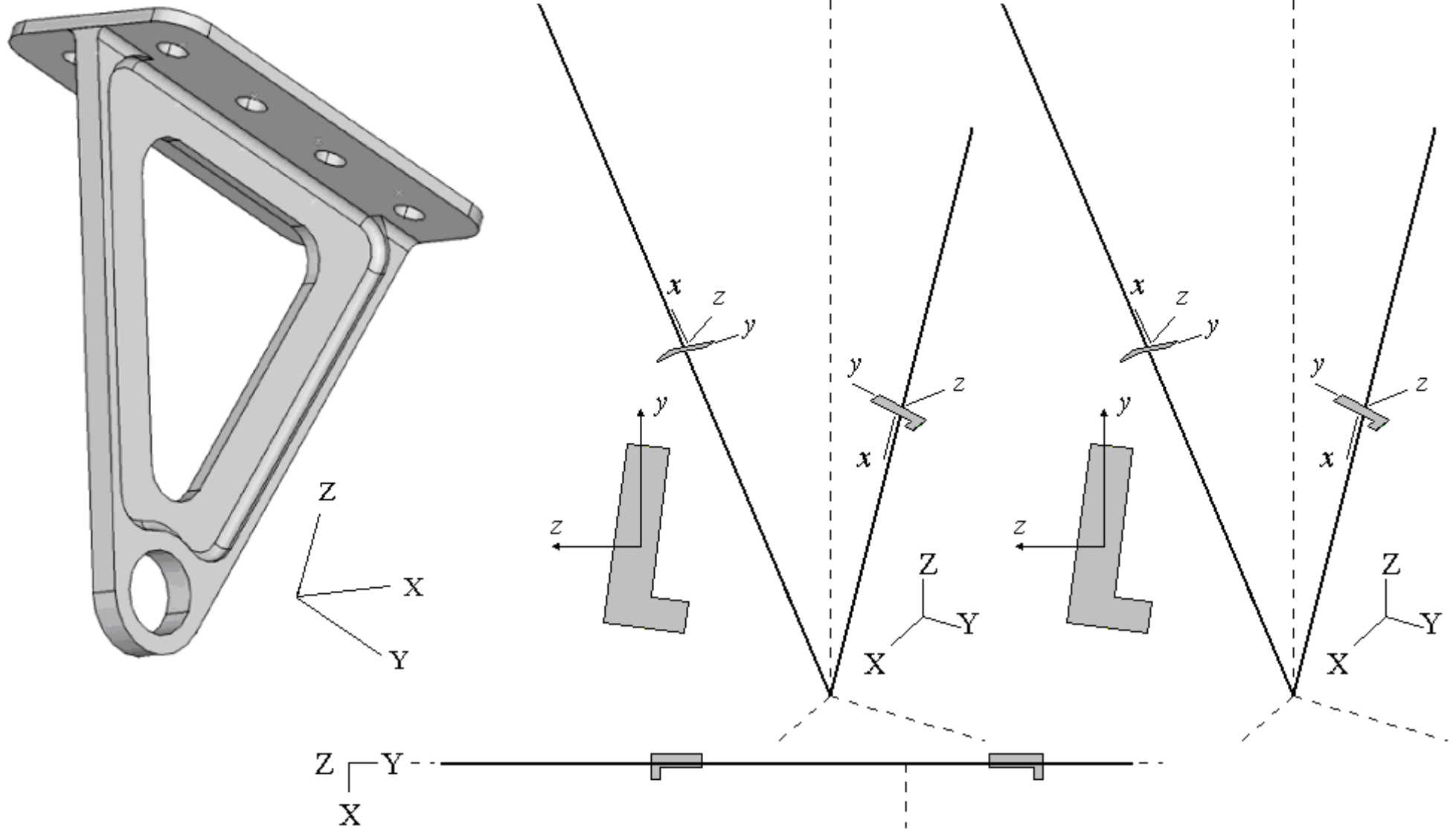
A partir de la morphologie de la structure, des conditions aux limites, quelques réflexes à avoir :

- imaginer les modes de sollicitation sur les parties travaillantes de la structure
- rechercher comment « respire » la structure
- faire appel au sens mécanique du concepteur-calculateur et **conserver un esprit critique avant et après le calcul !**



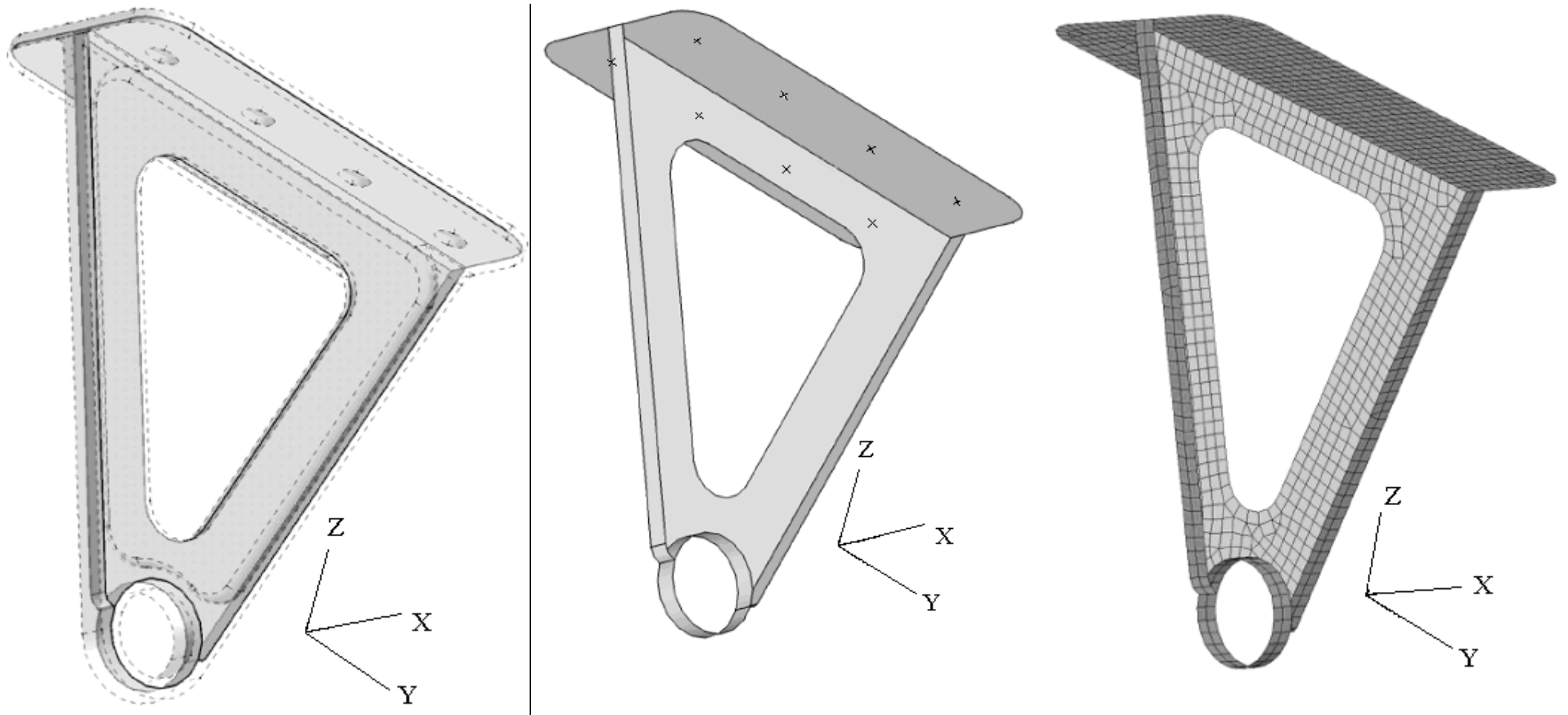
5.2 Modélisation en éléments poutres

Rappel du comportement de poutre. Principe de l'élaboration du modèle en éléments poutres et conditions aux limites, cas particulier du modèle en éléments barres RDM6 (fichiers ferrure-poutre.por et ferrure-barre.por)



5.3 Modélisation en éléments plaques

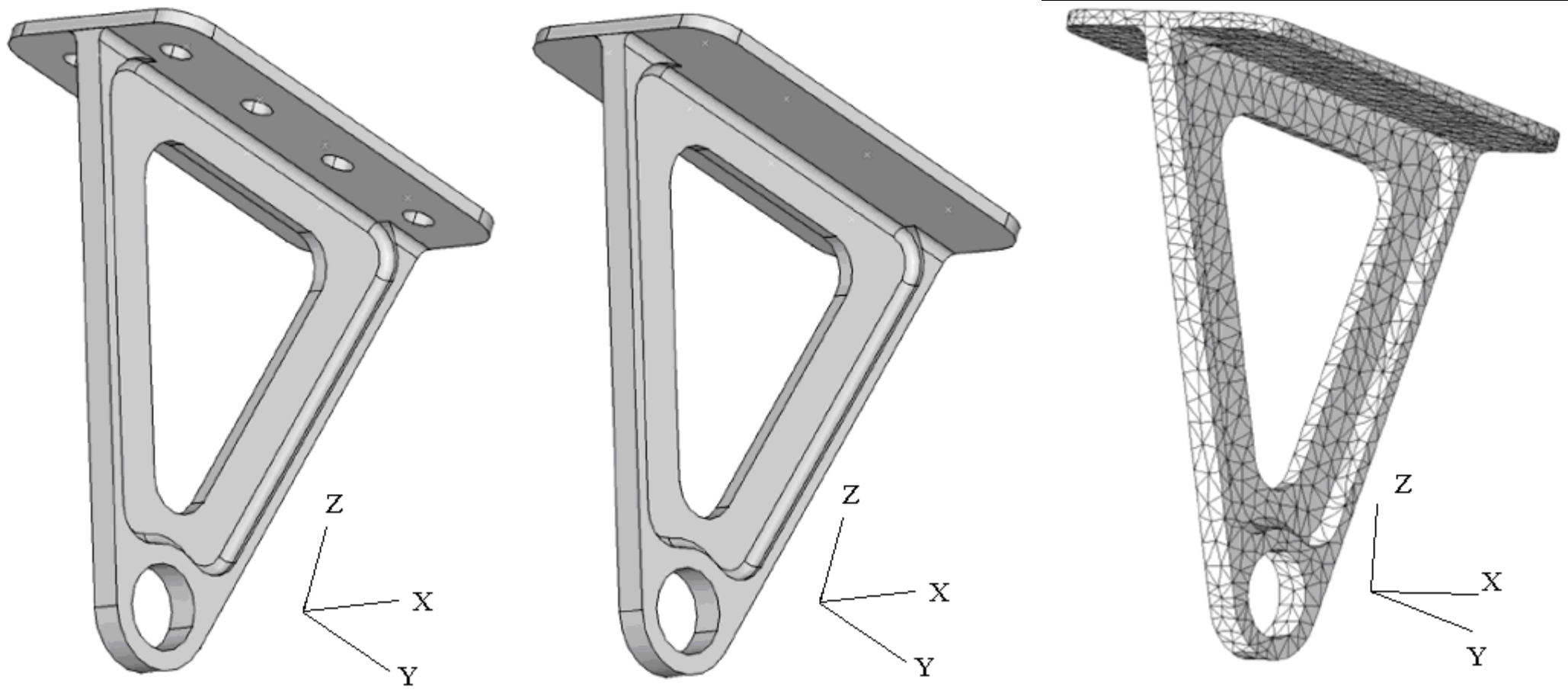
Rappel du comportement de plaque - Principe de l'élaboration du modèle en éléments plaques et conditions aux limites
CATIA V5 (fichier ferrure-plaque3)



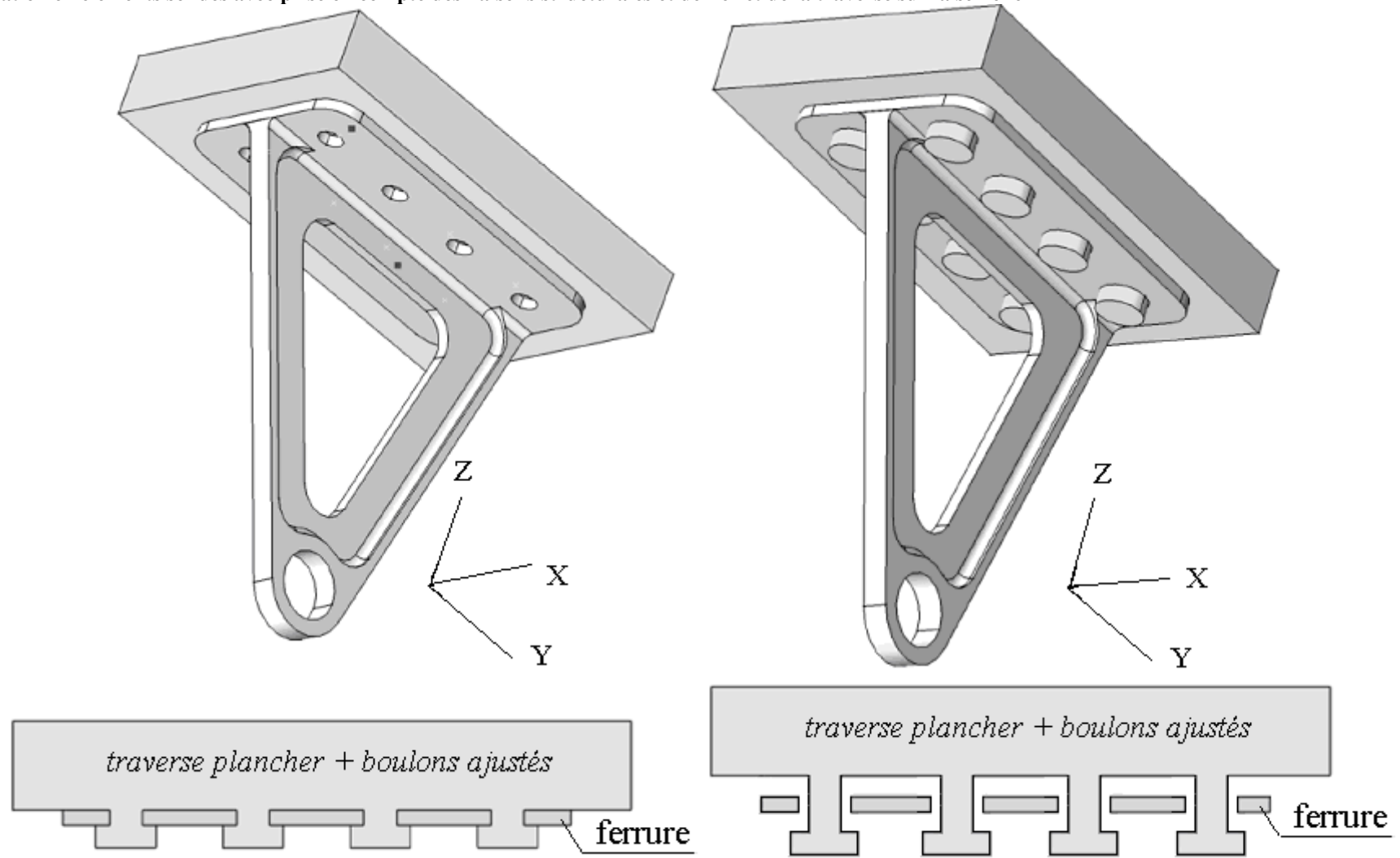
5.4 Modélisation en éléments solides

Rappel du comportement de l'état quelconque de contraintes - Principe de l'élaboration du modèle en éléments solides et conditions aux limites

CATIA V5 (fichier ferrure-solide3)



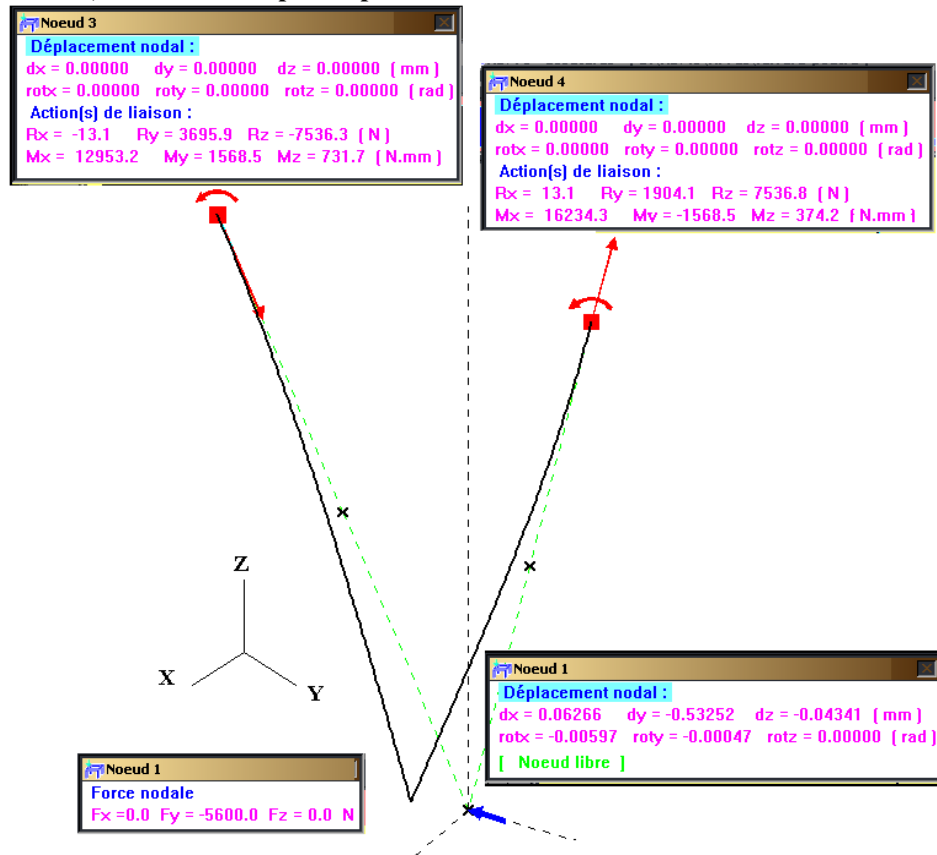
5.5 Modélisation en éléments solides avec prise en compte des liaisons structurales et de l'effet de la traverse sur la semelle



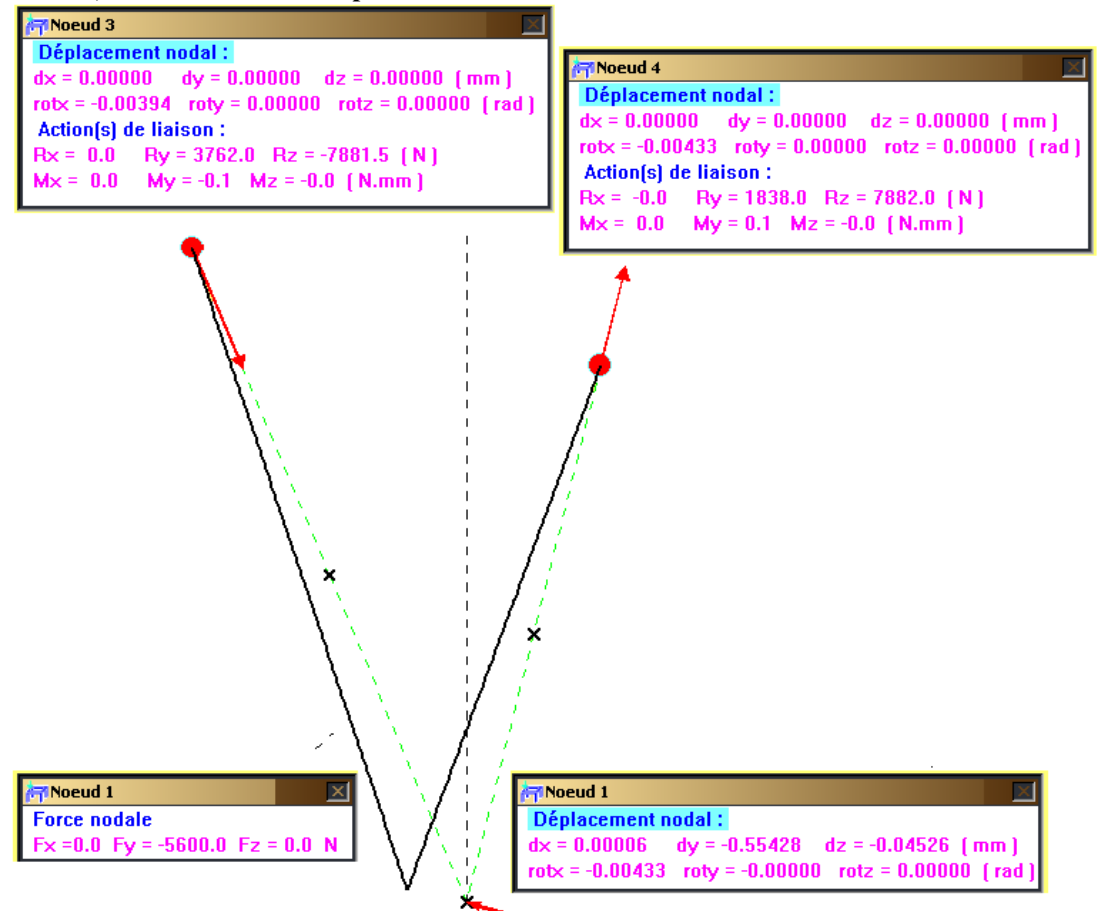
6. ANALYSE ET EXPLOITATION DES RESULTATS

6.1 Résultats en déplacements et efforts transmissibles RDM6

RDM6 ; fichier ferrure-poutre.por

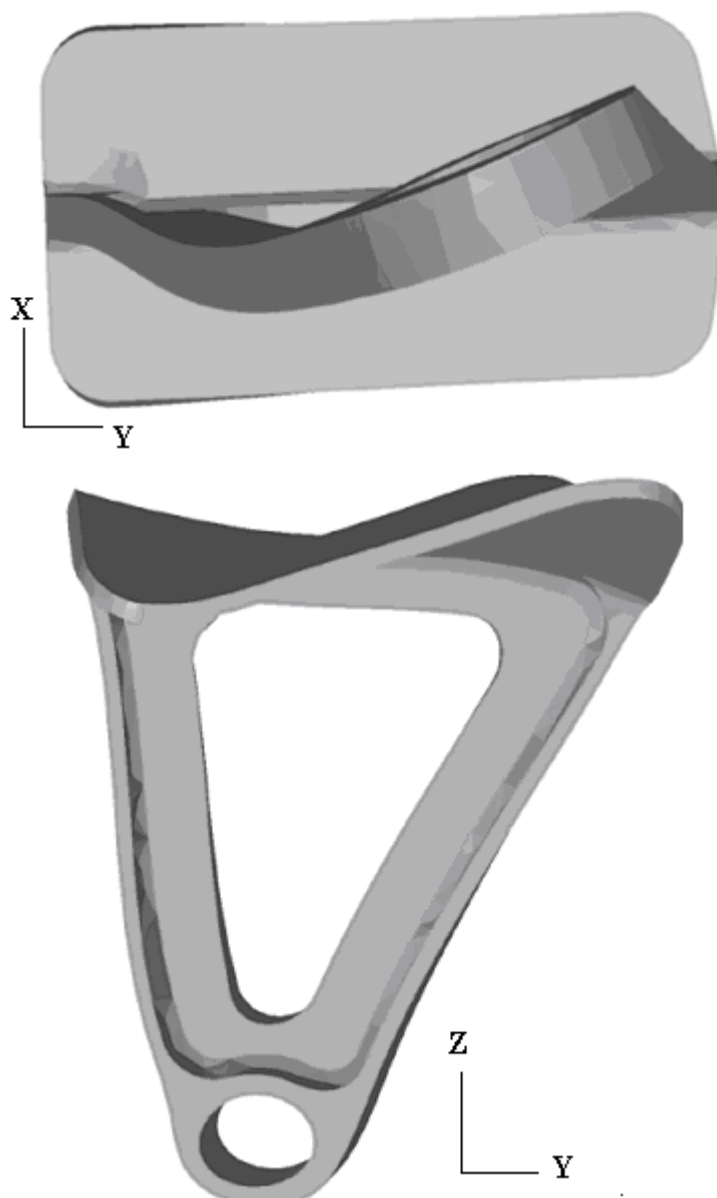


RDM6 ; fichier ferrure-barre.por



6.2 Résultats en déplacements CATIA V5 (fichier ferrure-solide3)

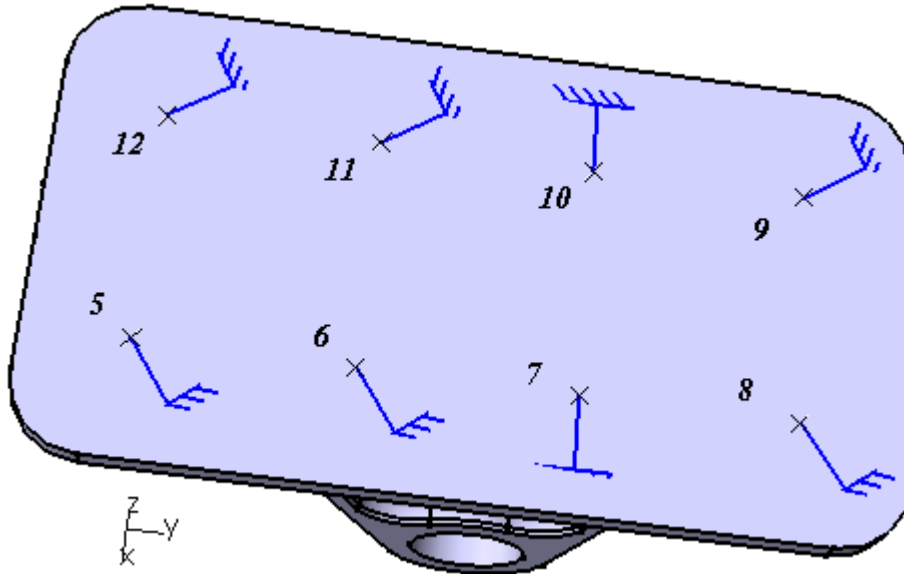
Amplification de l'allure déformée de la structure (corrélation avec les remarques formulées dans les préliminaires avant modélisation)



6.3 Modélisations des actions mécaniques transmissibles de la traverse sur boulons

CATIA V5 (fichier ferrure-solide3)

Calcul très pénalisant vu que la traverse ne reprend pas l'action de la semelle de la ferrure



Résultats CATIA V5 : interpréter les résultats en forces et moments,
Attention : moments au **centre géométrique** de chaque liaison rotule

Actions mécaniques transmissibles de la traverse sur boulons	X	Y	Z	L	M	N
Encastrement.5	-3495,561N	203,651N	-3383,954N	-5,665e-006Nxm	-7,517e-006Nxm	5,399e-006Nxm
Encastrement.6	-880,973N	1224,012N	-98,929N	-3,373e-006Nxm	-2,355e-006Nxm	8,956e-007Nxm
Encastrement.7	1155,215N	1207,168N	116,651N	-3,31e-006Nxm	3,096e-006Nxm	7,374e-007Nxm
Encastrement.8	3489,529N	-167,648N	3374,091N	-1,739e-006Nxm	7,507e-006Nxm	2,171e-006Nxm
Encastrement.9	-3859,679N	110,466N	4295,011N	-3,102e-006Nxm	-1,068e-005Nxm	-2,513e-006Nxm
Encastrement.10	-842,448N	1558,704N	177,423N	-4,274e-006Nxm	-2,314e-006Nxm	3,464e-008Nxm
Encastrement.11	1006,892N	1434,527N	-263,466N	-3,977e-006Nxm	2,767e-006Nxm	-1,372e-007Nxm
Encastrement.12	3427,026N	29,12N	-4189,863N	-6,403e-006Nxm	9,489e-006Nxm	-5,171e-006Nxm

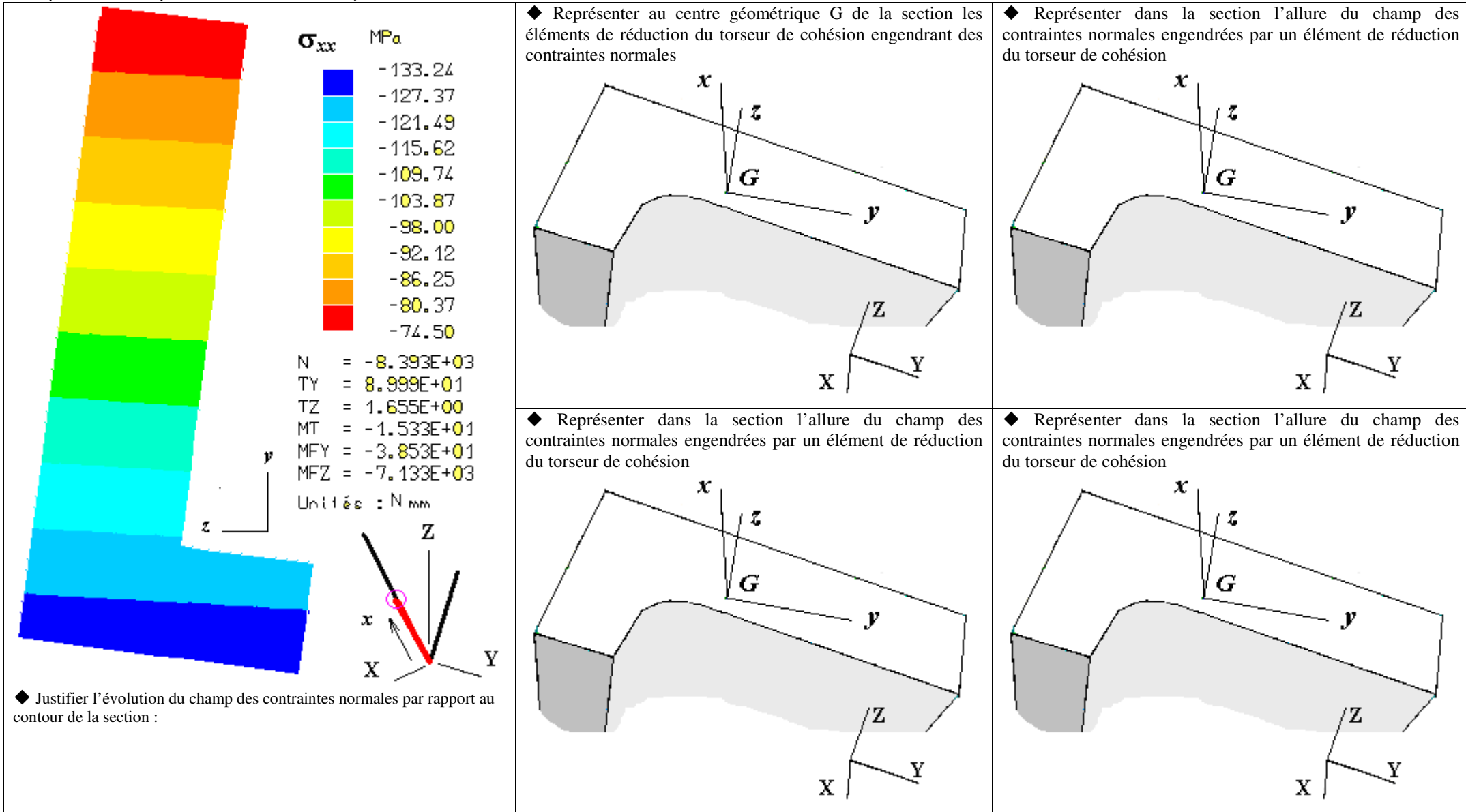
Attention : moments au point **O origine** du repère global : X=0 ; Y=0 ; Z=0

Actions mécaniques transmissibles de la traverse sur boulons	X	Y	Z	L	M	N
Encastrement.5	-3495,561N	203,651N	-3383,954N	170,344Nxm	-349,064Nxm	-196,97Nxm
Encastrement.6	-880,973N	1224,012N	-98,929N	-142,813Nxm	-102,88Nxm	-1,127Nxm
Encastrement.7	1155,215N	1207,168N	116,651N	-143,653Nxm	135,164Nxm	23,869Nxm
Encastrement.8	3489,529N	-167,648N	3374,091N	116,954Nxm	348,541Nxm	-103,637Nxm
Encastrement.9	-3859,679N	110,466N	4295,011N	110,334Nxm	-406,782Nxm	109,613Nxm
Encastrement.10	-842,448N	1558,704N	177,423N	-185,486Nxm	-98,082Nxm	-19,06Nxm
Encastrement.11	1006,892N	1434,527N	-263,466N	-163,134Nxm	116,598Nxm	11,407Nxm
Encastrement.12	3427,026N	29,12N	-4189,863N	237,454Nxm	356,583Nxm	196,699Nxm

6.4 Résultats en contraintes dans une section droite en zone courante (Z=59.5 mm)

6.4.1 RDM6 (en repère local principal quadratique)

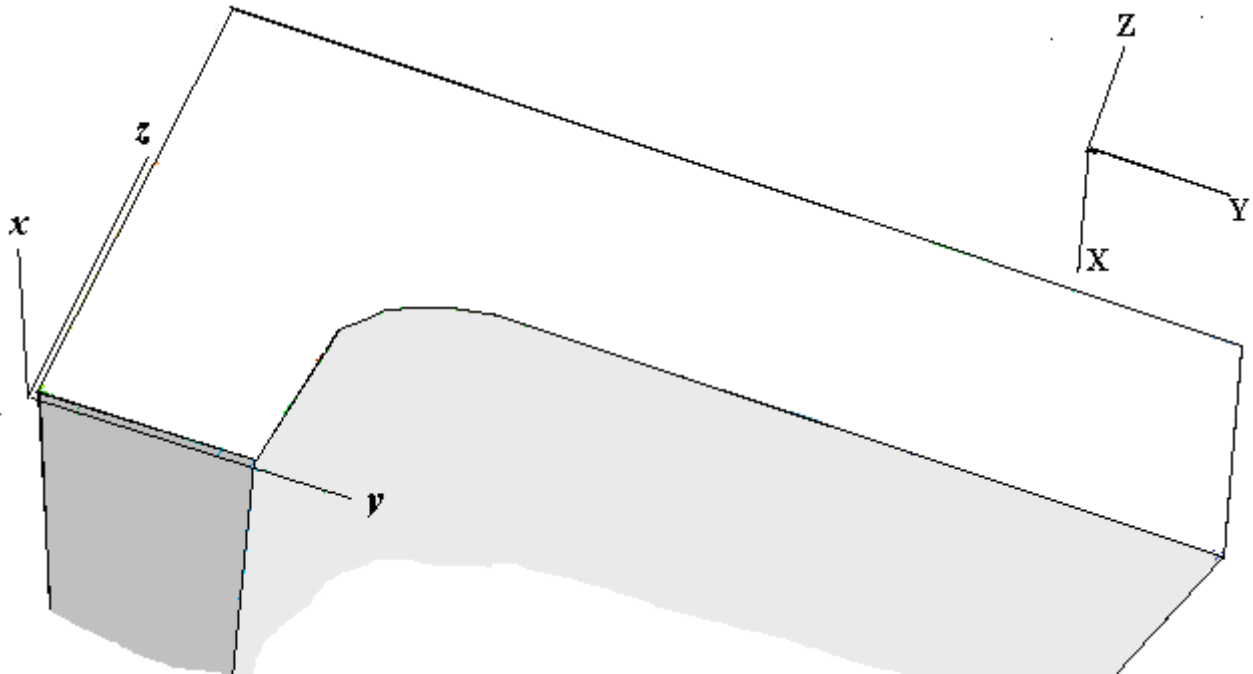
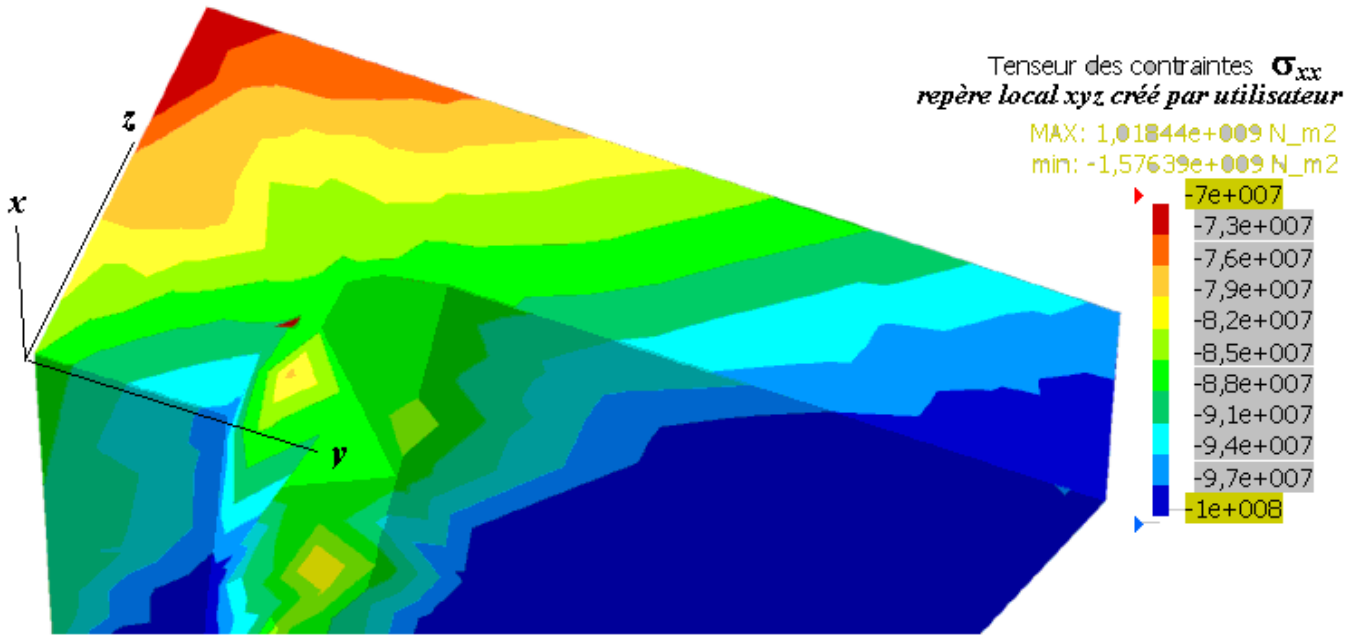
Comprendre et interpréter l'évolution du champ des *contraintes normales* dans une section courante d'un bras



◆ A partir des trois représentations des champs des contraintes indiquer le point de la section où se trouve la contrainte normale maximale et comparer avec le champ des contraintes représenté par la palette d'isocoupleurs

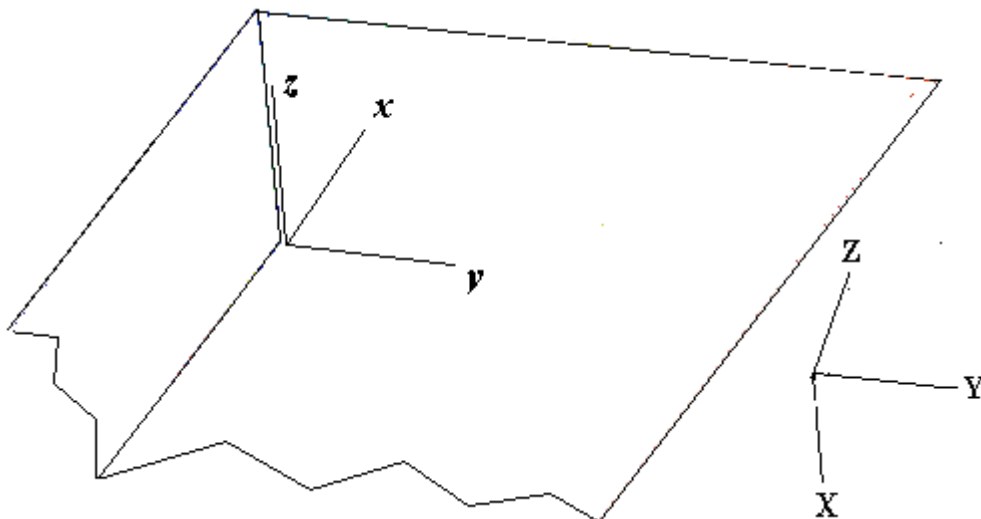
6.4.2 CATIA V5 solides : contraintes normales dans repère local utilisateur

Comparer l'évolution du champ des contraintes entre le modèle solides et le modèle poutre. Justifier



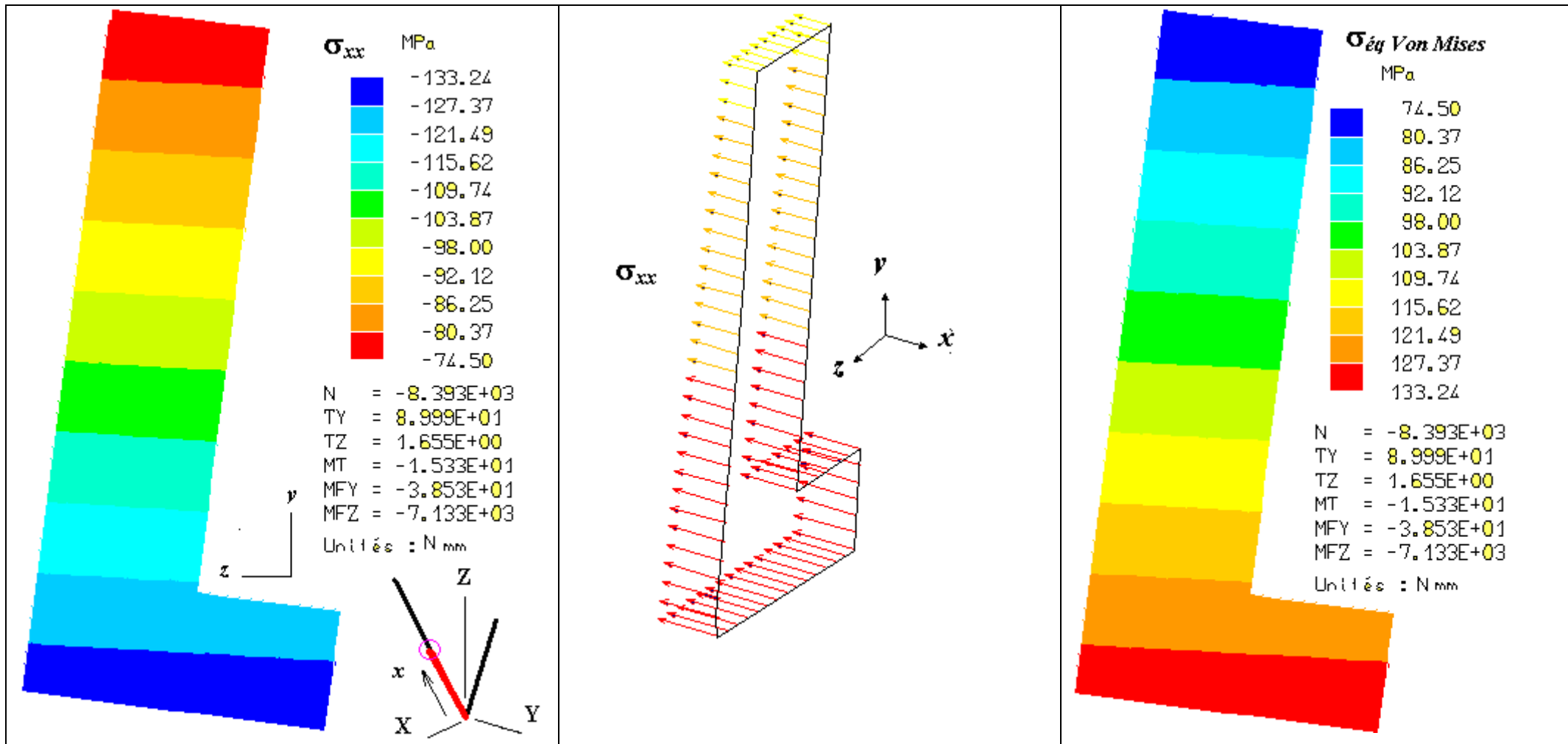
6.4.3 CATIA V5 plaques: contraintes normales dans repère local utilisateur

Où analyser des contraintes sur une modélisation en éléments plaques ? :: peau supérieure ou peau inférieure de la plaque ou surface moyenne



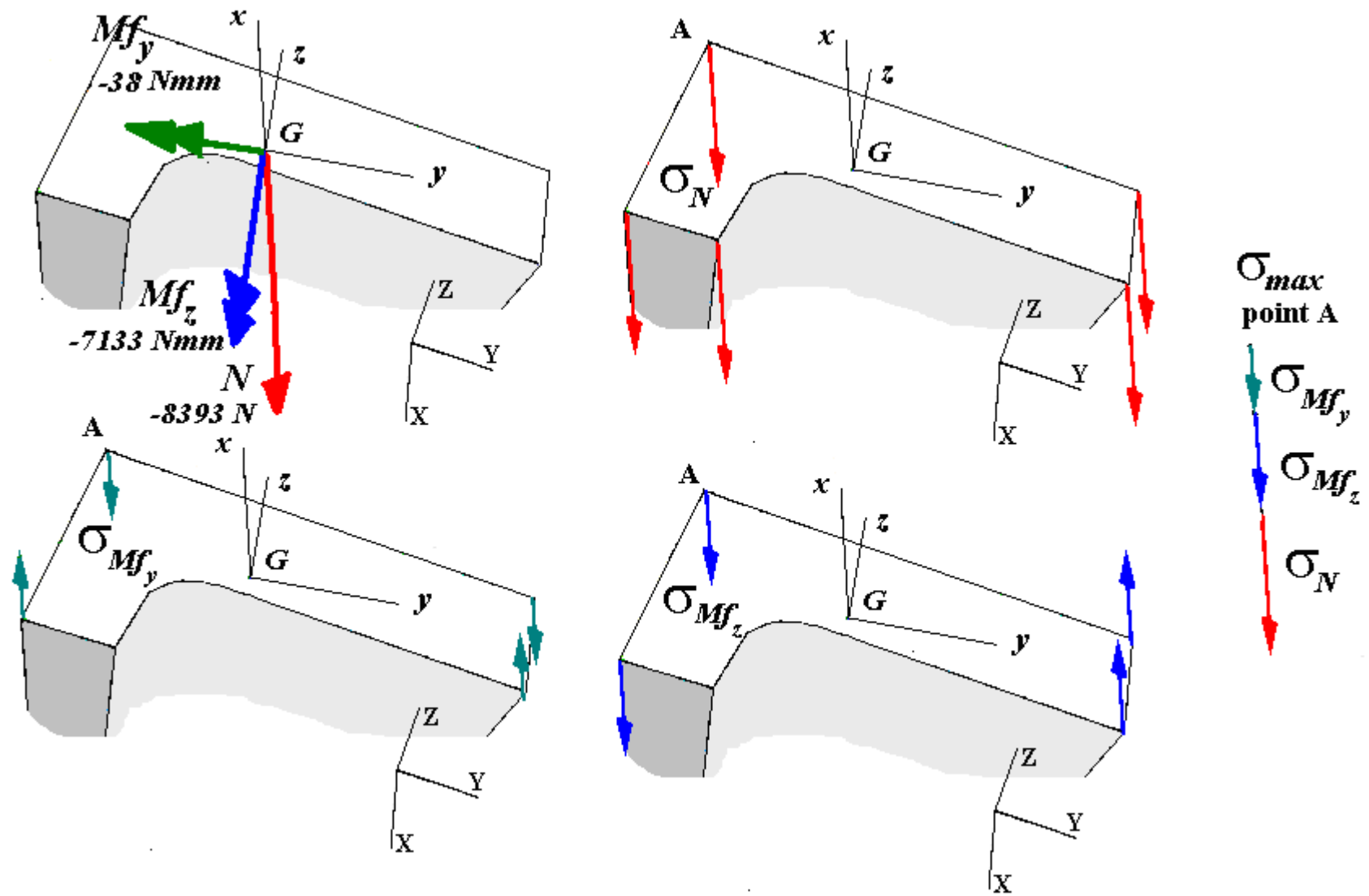
ELEMENTS DE CORRECTION

RDM6 (en repère local principal quadratique)

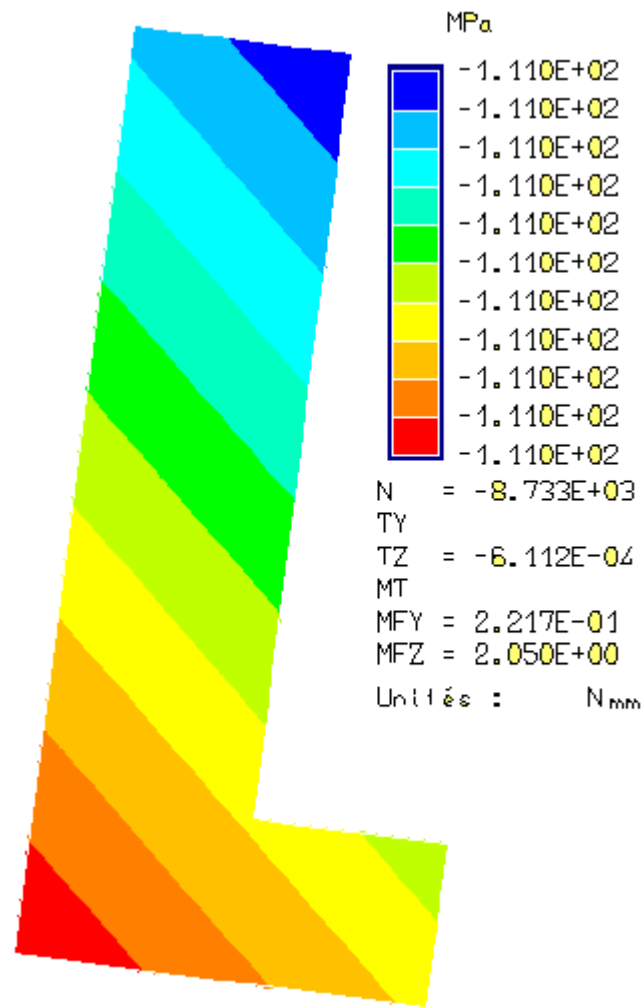
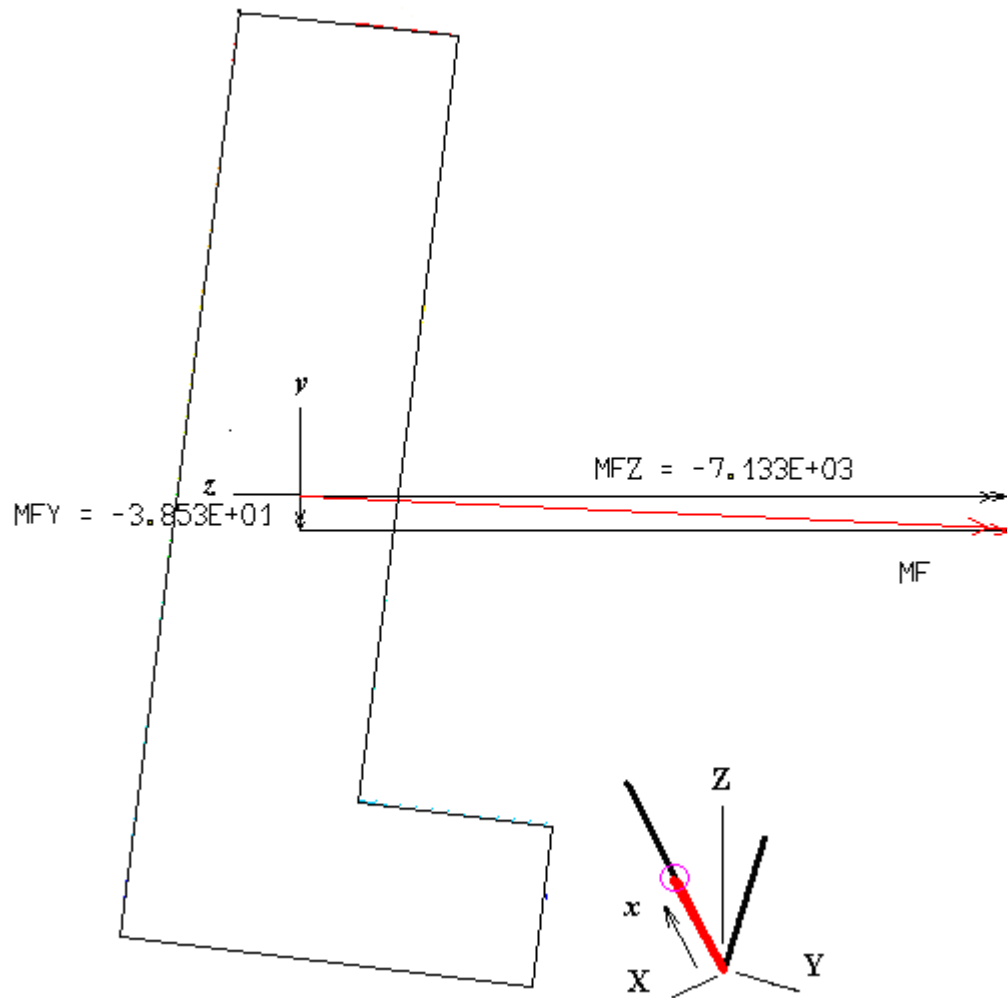


◆ Commentaires sur la répartition des contraintes normales : le repère local principal étant légèrement décalé angulairement par rapport au contour de la section le moment de flexion a donc deux composantes sur y et z locaux alors que le chargement est porté sur Y

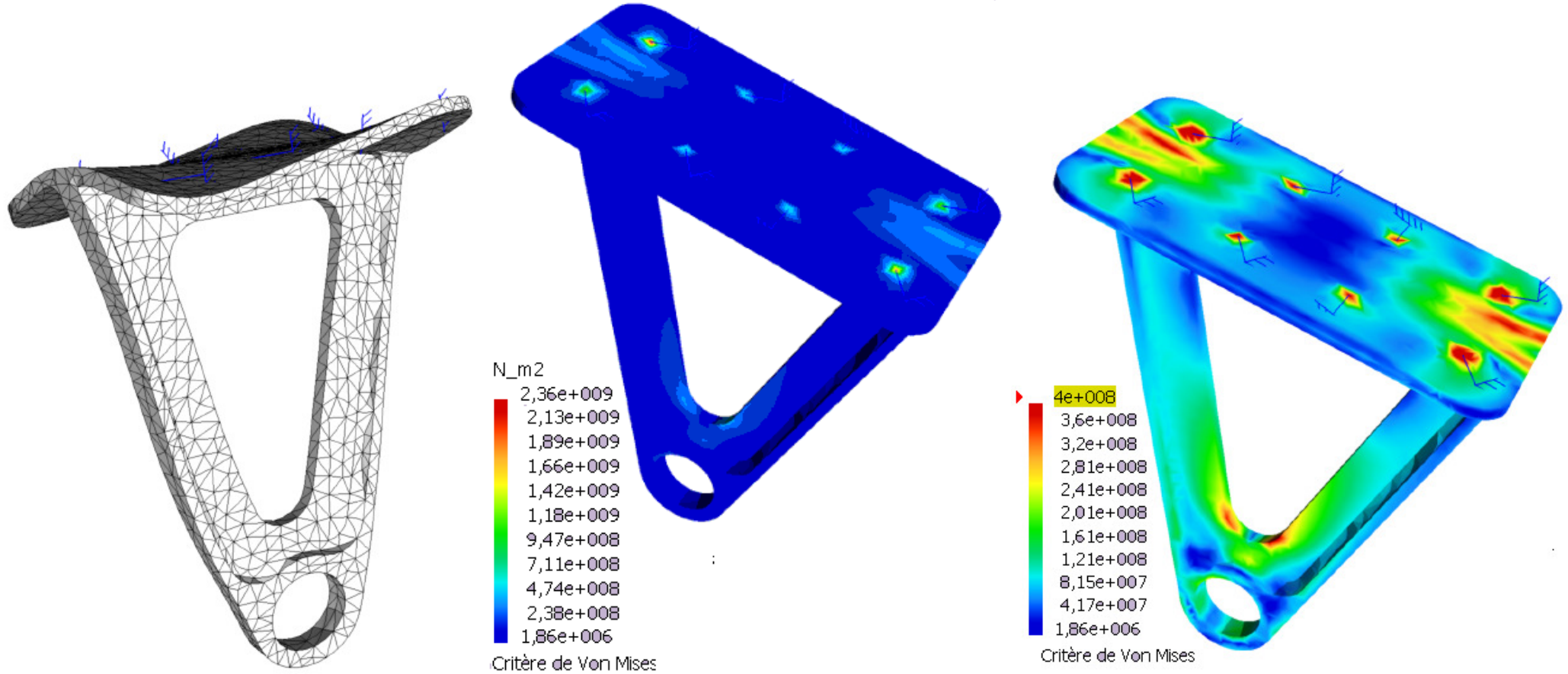
◆ Commentaires : poser la question : VM et sigma xx mêmes niveau de contrainte pourquoi ?



Remarque : compte tenu que la section n'a pas de symétrie par rapport à son centre géométrique (par ex section circulaire) le moment résultant de flexion M_f n'a pas son support parallèle à l'axe X



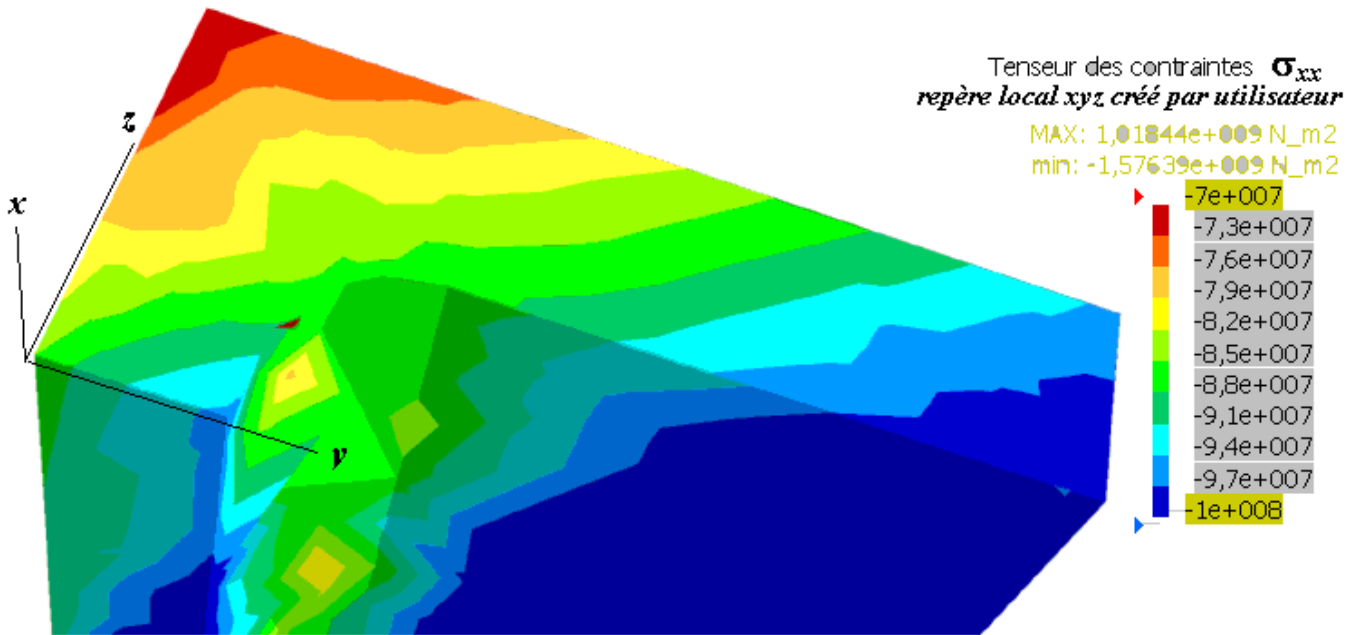
global



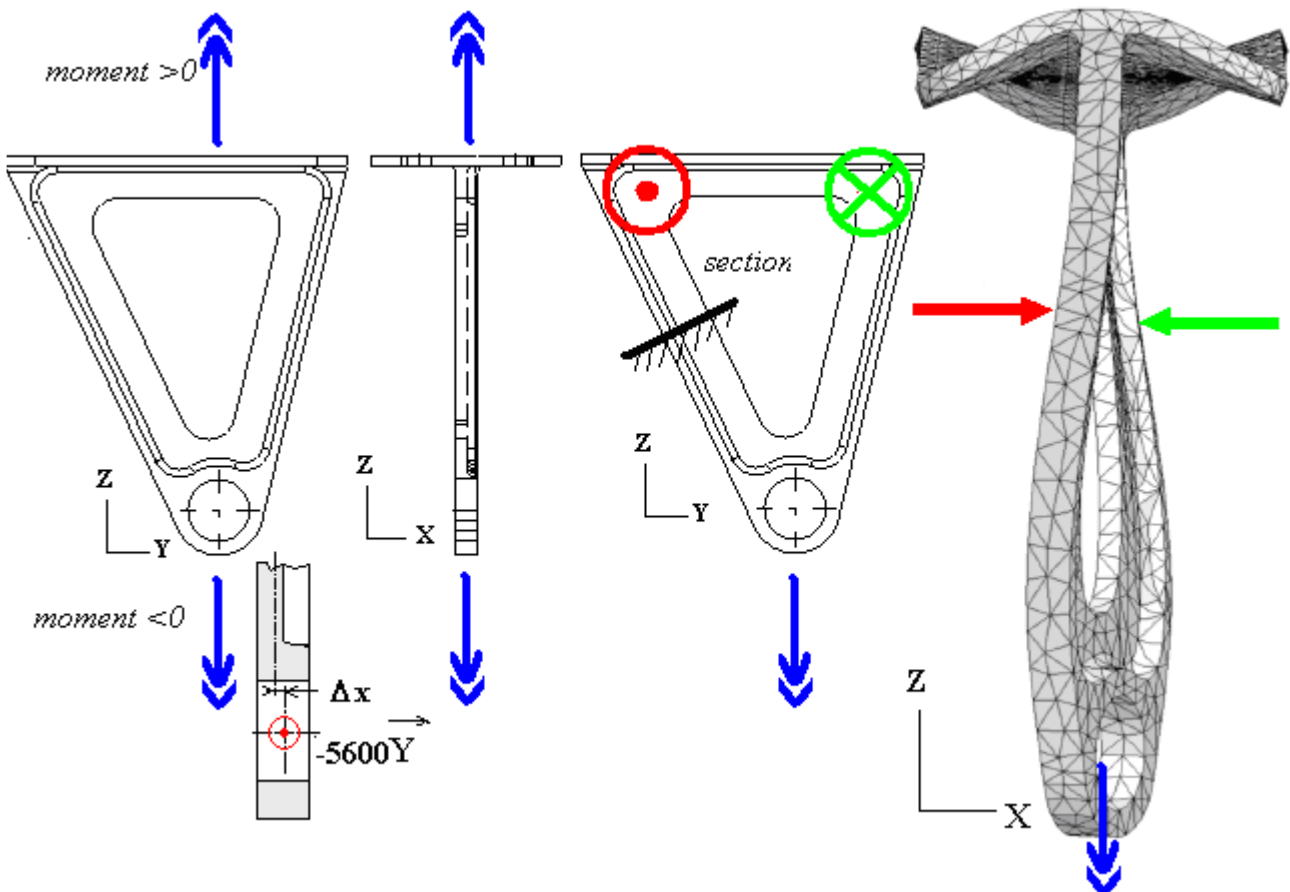
on constate le libre festonnement des bords de la semelle de la ferrure et des pointes de contraintes aux 8 nœuds rotulés si l'on veut analyser ces contraintes il faut masquer ces contraintes élevées

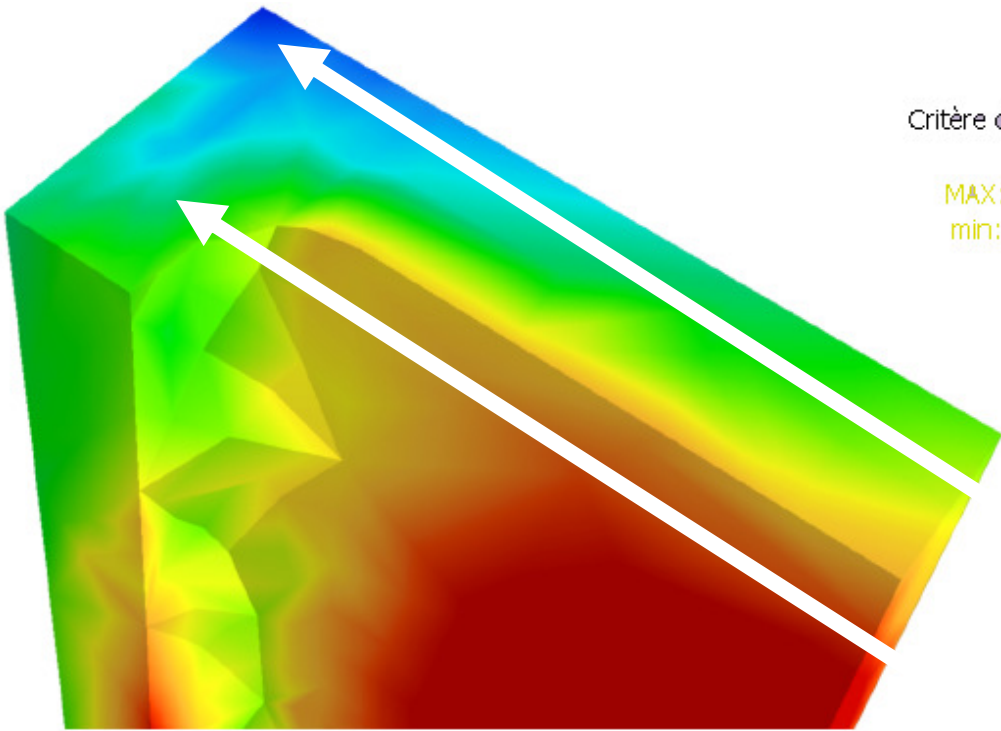
dans repère local xyz créé par l'utilisateur

Comparer l'évolution du champ des contraintes entre le modèle solides et le modèle poutre



Pour la même cote $z=59.5$, on constate des niveaux moyens de contraintes normales du même ordre de grandeur entre le modèle poutres (RDM6) et solides mais avec une répartition un peu différente. Le chargement ($-5600\vec{Y}$) pour le modèle poutre est appliqué sur un nœud du plan moyen de la structure YZ (défini par les deux lignes moyennes) alors que pour le modèle solide nous avons chargé au centre géométrique de l'alsage. Ce chargement déporté engendre un moment <0 ($-5600 \times \Delta x$) porté par l'axe Z (engendrant la déformation de torsion constatée). Il doit être équilibré par un moment antagoniste >0 par les boulons de la traverse sur la semelle. La transmission de ce moment dans les deux bras peut se modéliser par un couple de forces intérieures (efforts tranchant de direction X) engendrant des effets de flexion opposés dans chaque bras. Pour la section analysée du bras considéré ceci se traduit par un moment de flexion $/y >0$ (repère local) inverse de celui du modèle poutre (cf résultats RDM6) donc engendrant des contraintes de signes opposés. Par cette analyse du comportement des bras on peut justifier cette inversion de la répartition des contraintes normales dans la section par rapport au modèle poutre.



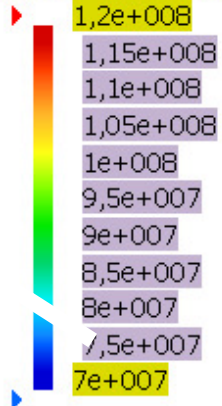


Critère de Von Mises (aux noeuds)

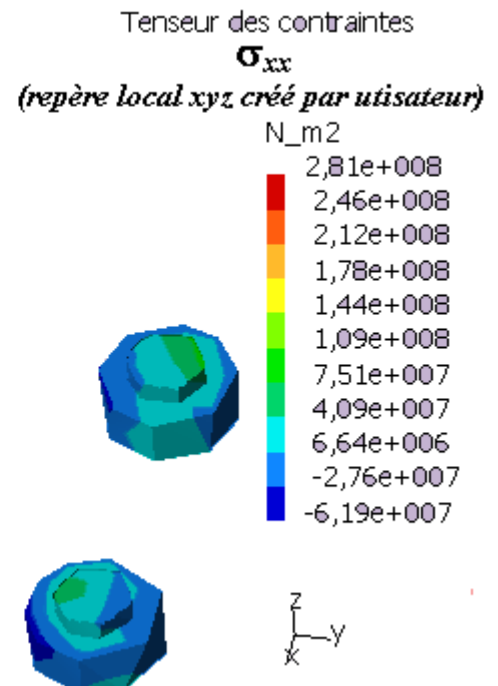
Bloquee

MAX: 2,36445e+009 N_m2

min: 1,85623e+006 N_m2

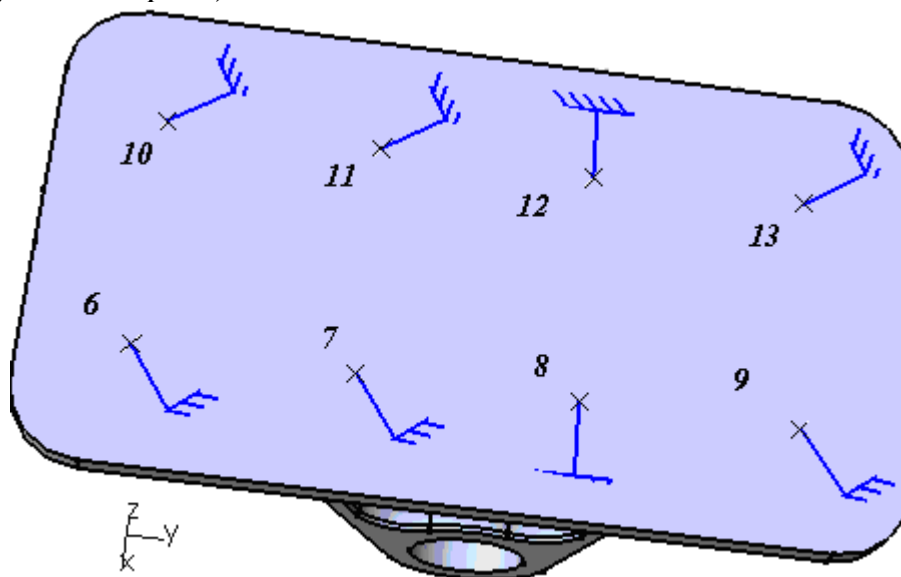


Champ des contraintes dans les sections droites des corps cylindriques des boulons ajustés (éléments contacts entre traverse-ferrure , ferrure-têtes des boulons, ferrure-corps cylindrique des boulons)
 CATIA V (fichier : ferrure3-bati-boulons)

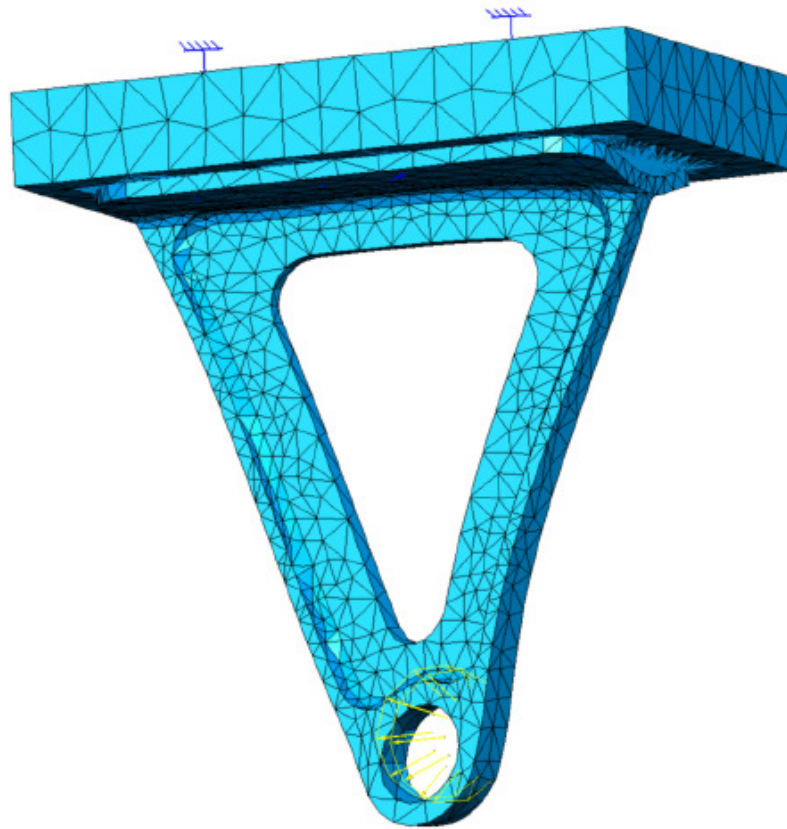


On observe des comportements difficiles à interpréter, la déformation de la semelle perturbant l'état des contraintes ainsi que la reprise des efforts par la traverse, pour mesurer la tension dans les boulons il faudrait mettre des éléments contacts uniquement entre les têtes et la ferrure

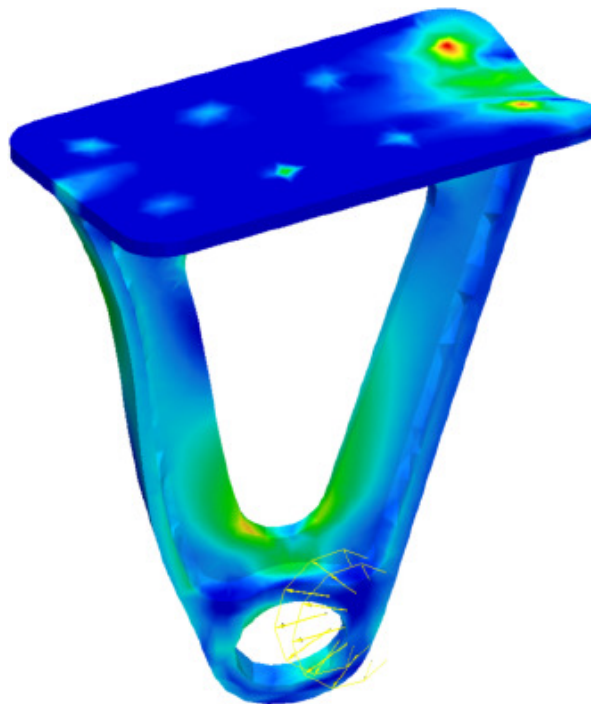
Resultats éléments contacts entre ferrure-traverse et 8 rotules
 CATIA V (fichier : ferrure3-bati-points)



Actions mécaniques transmissibles de la traverse sur boulons	X	Y	Z	L	M	N
Encastrement.6	-97,642N	1280,546N	197,631N	-163,749Nxm	-15,527Nxm	19,705Nxm
Encastrement.7	147,231N	803,294N	195,257N	-101,206Nxm	13,66Nxm	20,116Nxm
Encastrement.8	465,367N	743,399N	494,042N	-88,465Nxm	45,61Nxm	14,699Nxm
Encastrement.9	2091,449N	-245,451N	3674,976N	134,863Nxm	176,221Nxm	-64,981Nxm
Encastrement.10	143,589N	1243,044N	101,239N	-153,744Nxm	18,325Nxm	-6,944Nxm
Encastrement.11	-131,024N	1336,437N	301,609N	-167,707Nxm	-11,904Nxm	-20,109Nxm
Encastrement.12	-412,237N	926,312N	623,1N	-110,231Nxm	-41,437Nxm	-11,327Nxm
Encastrement.13	-2206,733N	-487,58N	4664,864N	192,135Nxm	-205,559Nxm	69,405Nxm

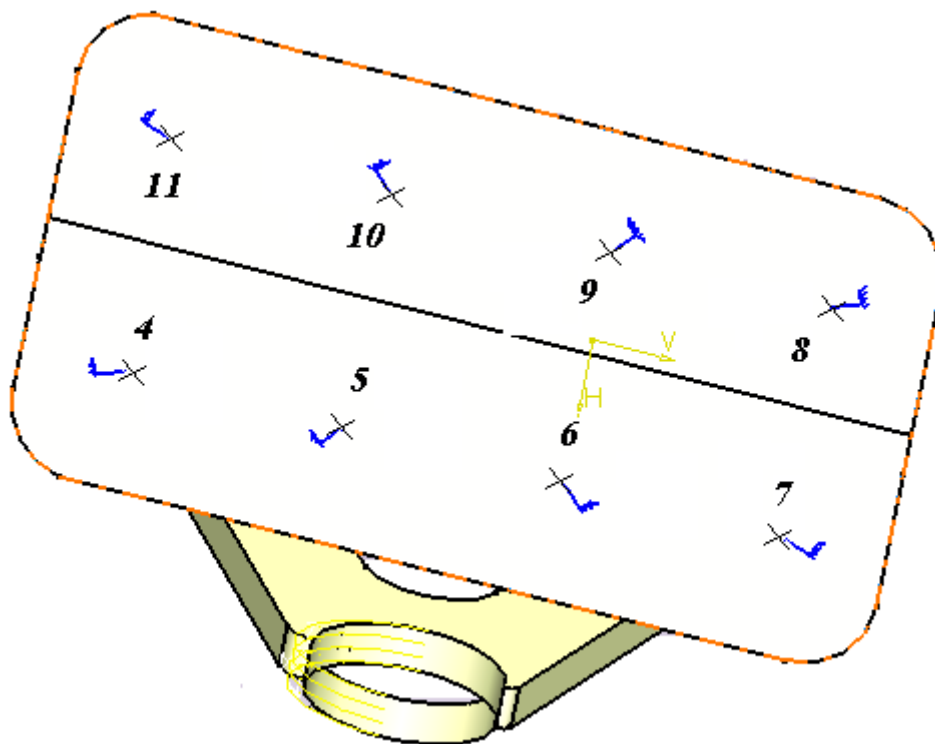


Von mises



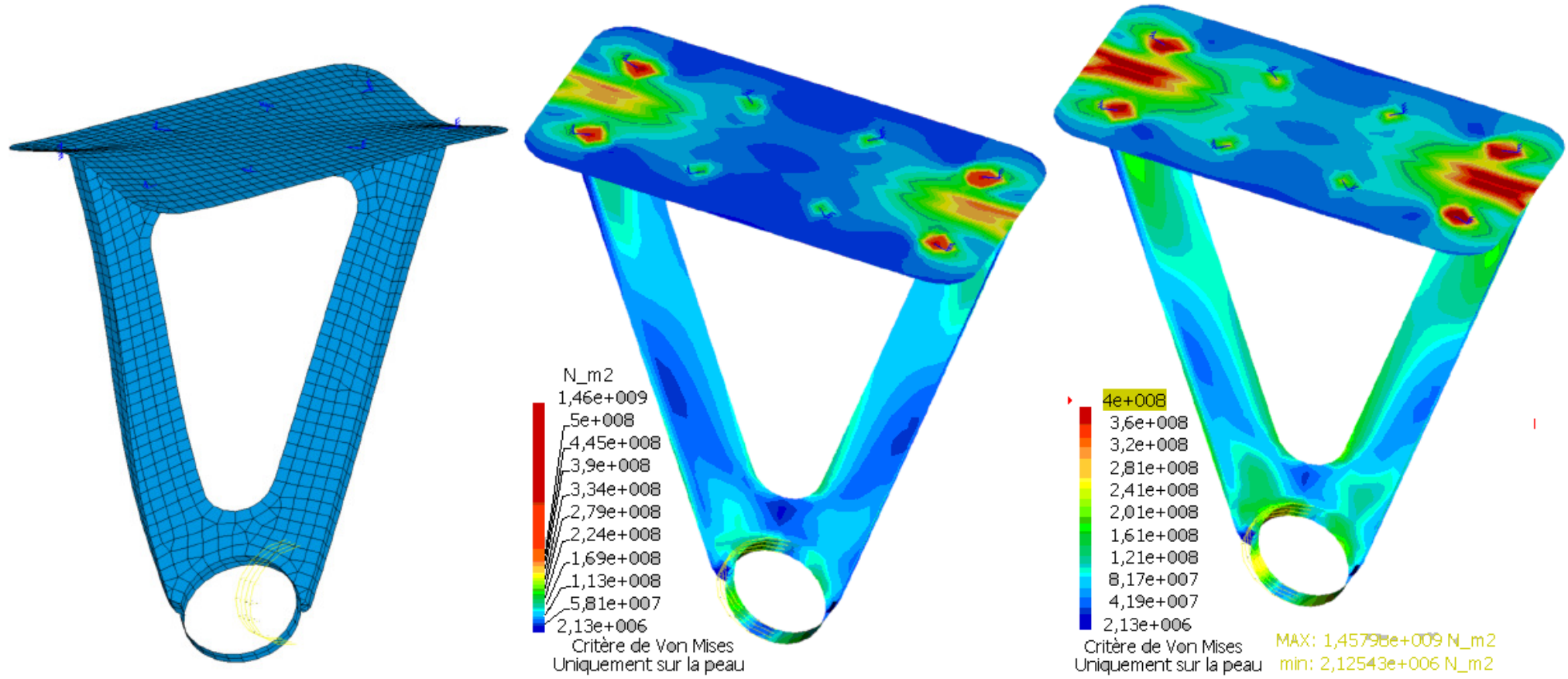
Les rotules 6 et 10 doivent empêcher la pénétration de la ferrure dans la traverse

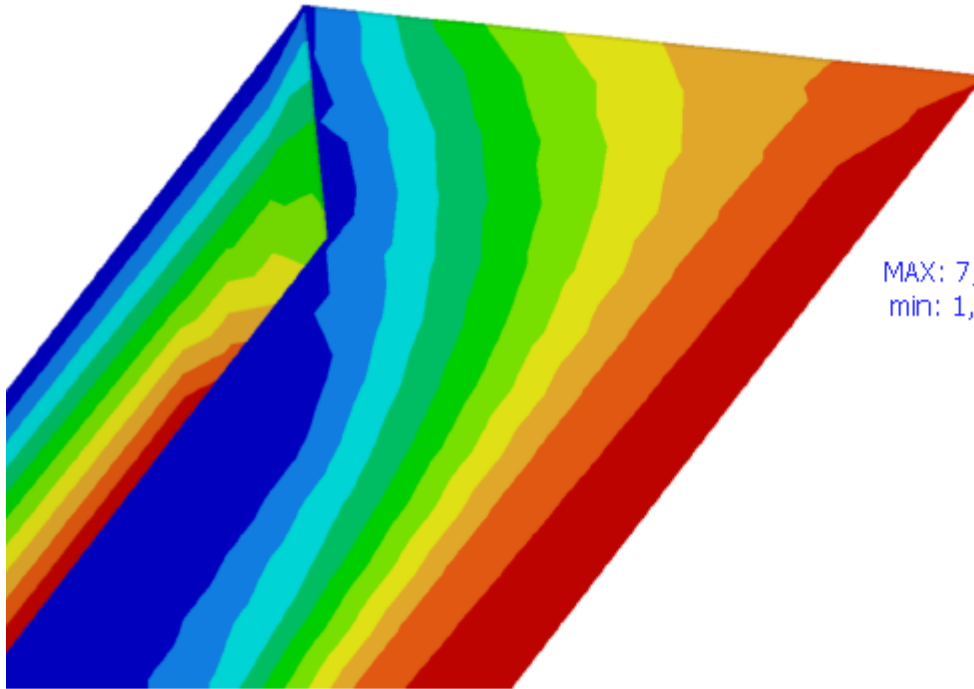
MODELISATION ELEMENTS PLAQUES
 CATIA V5 (fichier : ferrure-plaque3)



Actions mécaniques transmissibles de la traverse sur boulons	X	Y	Z	L	M	N
Encastrement.4	-78,852N	571,712N	-2973,44N	107,492Nxm	36,464Nxm	6,77Nxm
Encastrement.5	-268,949N	905,762N	-331,117N	-96,13Nxm	-28,562Nxm	10,176Nxm
Encastrement.6	335,317N	834,664N	294,893N	-97,555Nxm	36,967Nxm	16,503Nxm
Encastrement.7	165,008N	318,065N	2970,838N	51,833Nxm	-26,507Nxm	1,545Nxm
Encastrement.8	-312,192N	249,702N	4208,532N	96,817Nxm	-2,123Nxm	5,922Nxm
Encastrement.9	-304,981N	1023,556N	460,96N	-119,43Nxm	-33,795Nxm	-12,516Nxm
Encastrement.10	271,62N	1119,053N	-534,56N	-115,028Nxm	29,571Nxm	-5,875Nxm
Encastrement.11	193,03N	577,485N	-4096,105N	171,397Nxm	-12,016Nxm	4,038Nxm

CATIA V5 plaques: contraintes normales dans repère local utilisateur

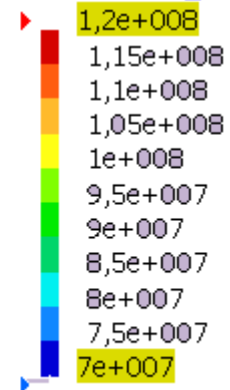




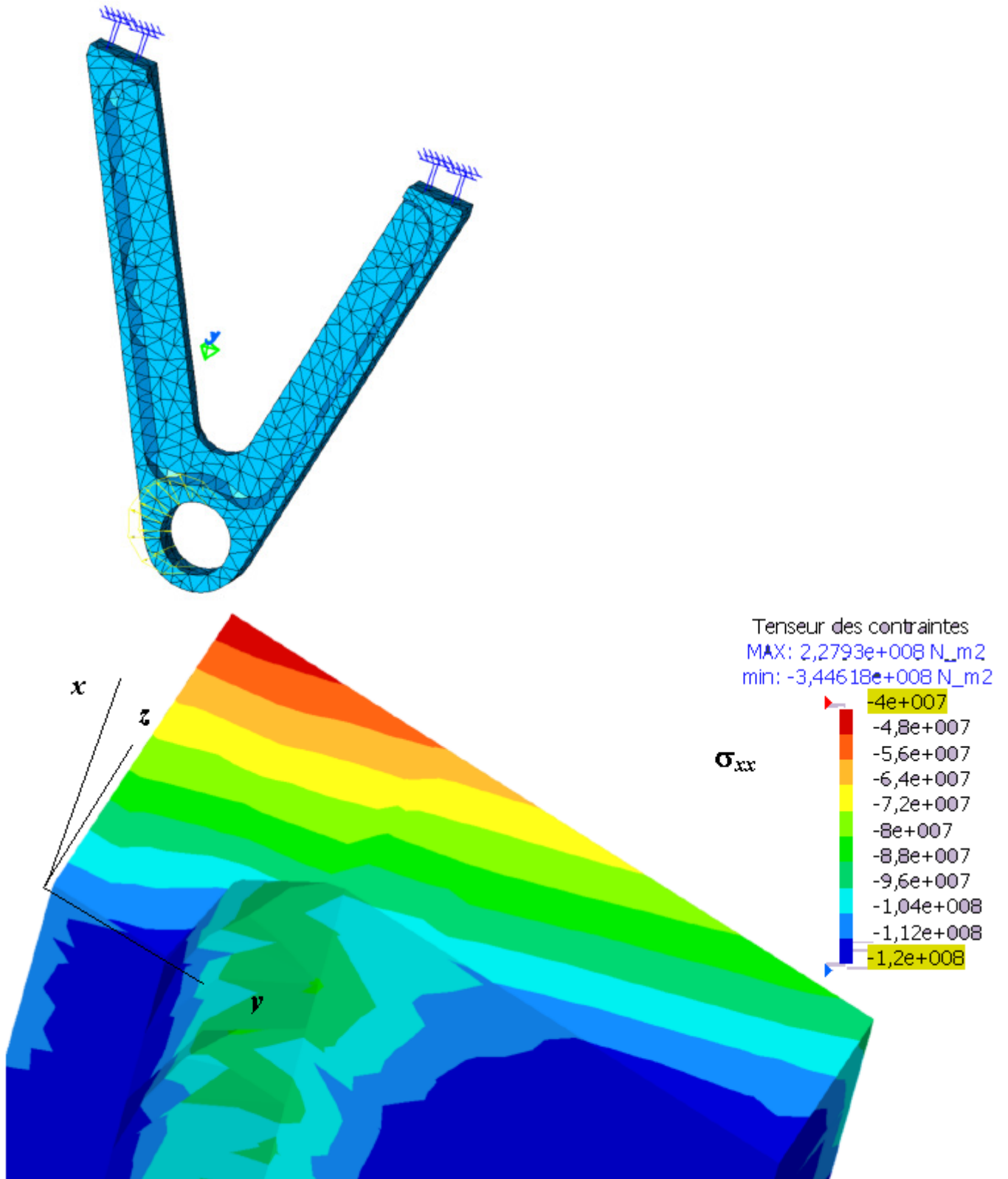
Von Mises

MAX: 7,98001e+008 N_m2

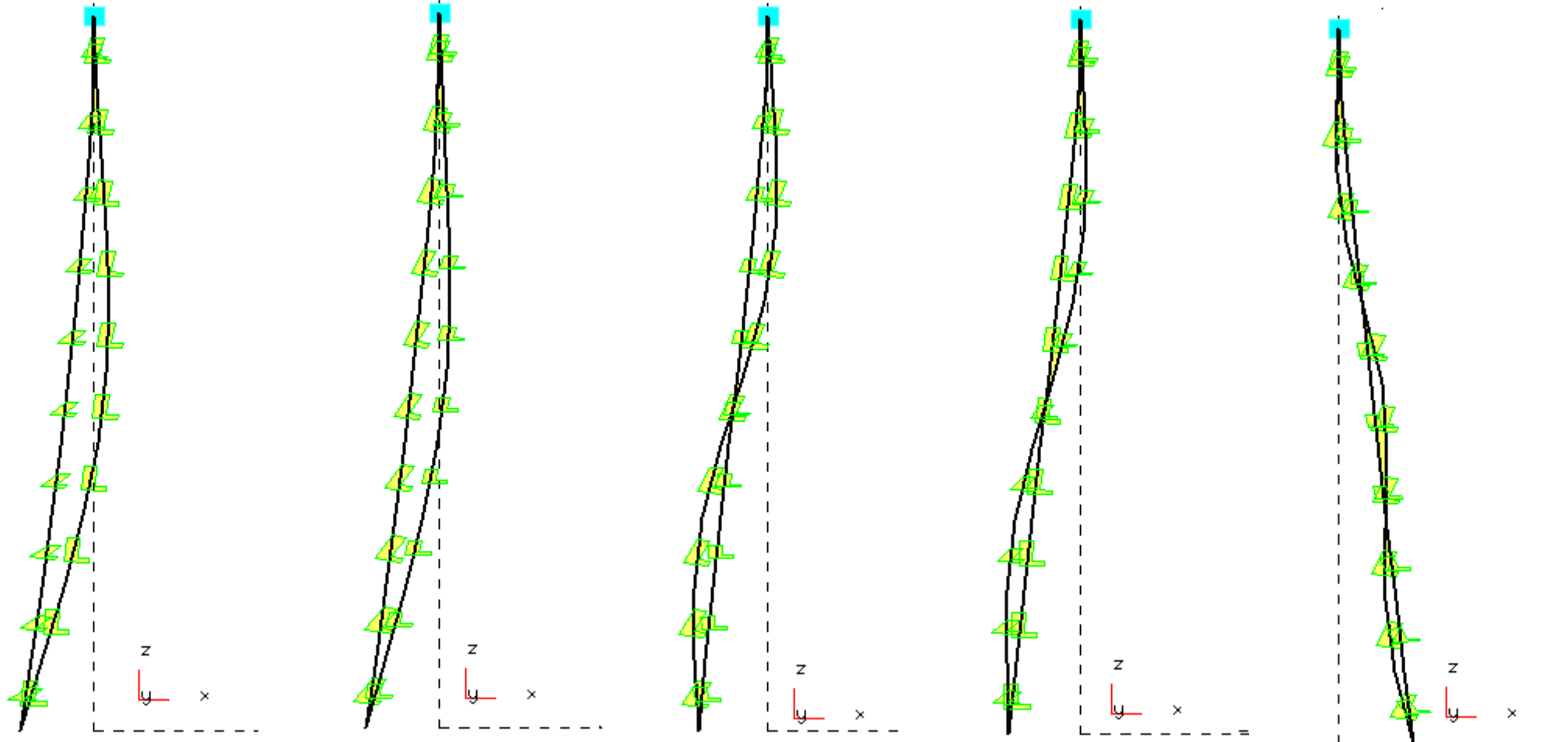
min: 1,78842e+006 N_m2



critère de Von Mises où ?



modes de flambement (ferrure-poutres)



FLAMBEMENT - MODE 1 -
COEF CRITIQUE = 2.058

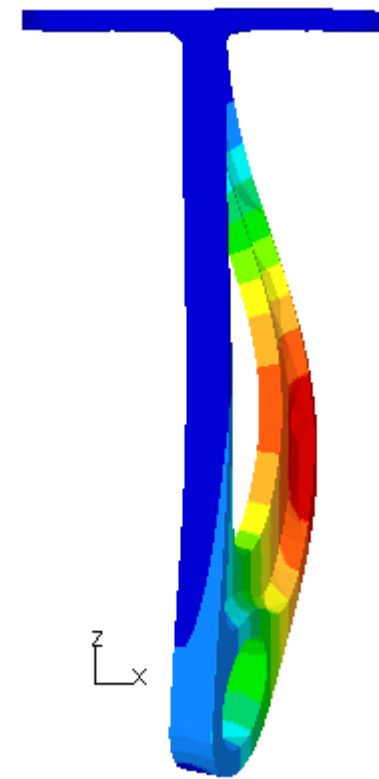
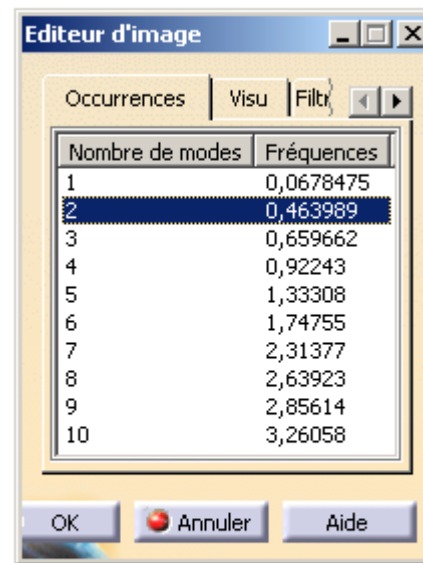
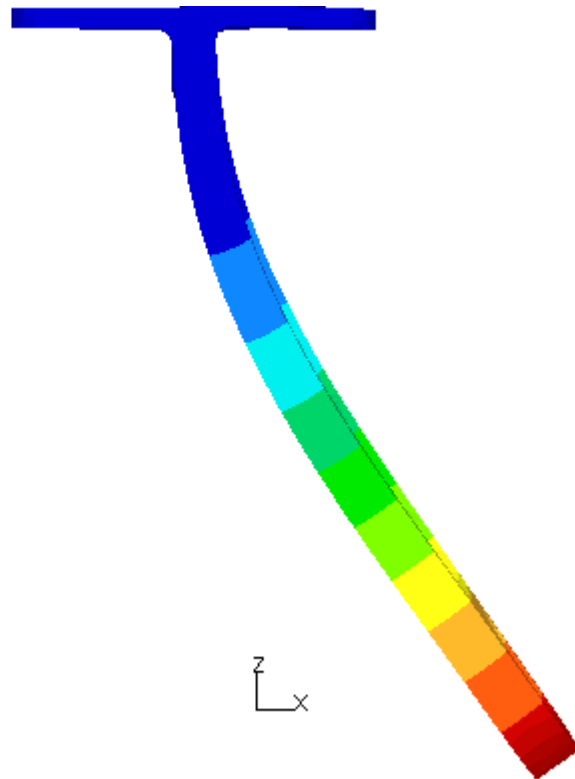
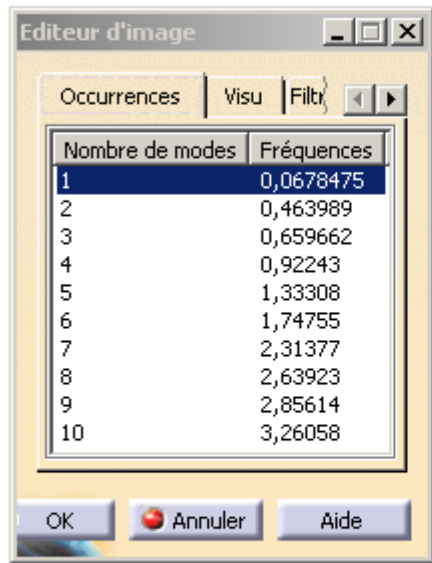
FLAMBEMENT - MODE 2
COEF CRITIQUE = -2.500

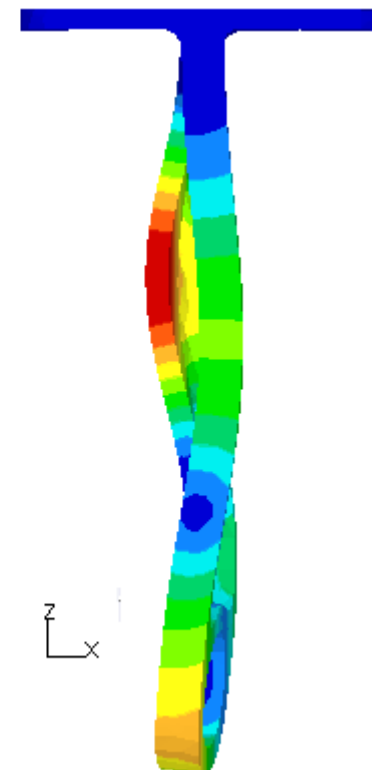
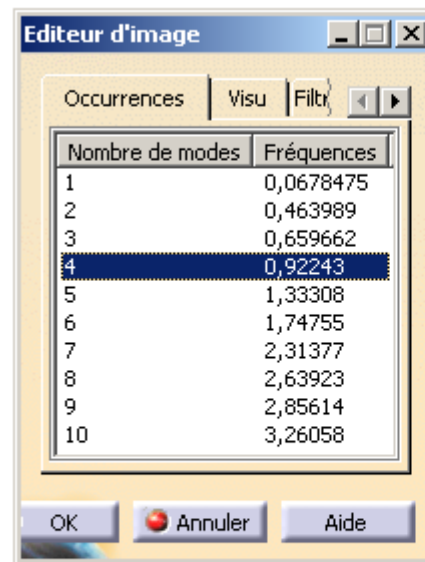
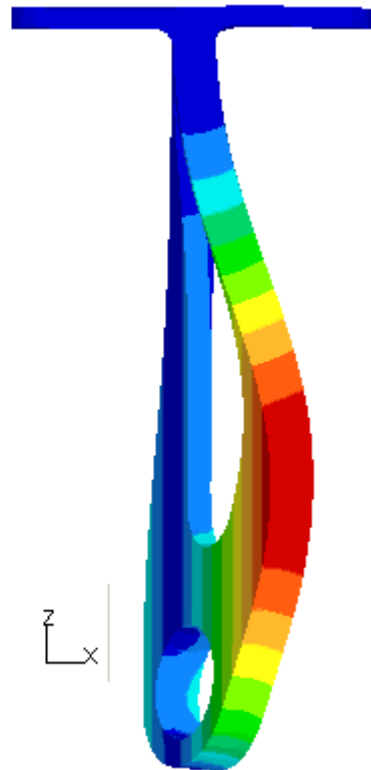
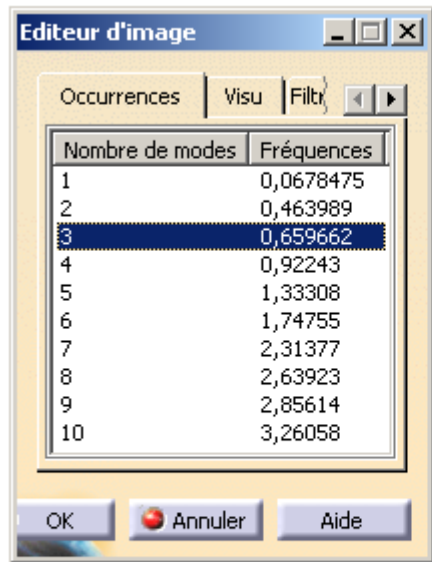
FLAMBEMENT - MODE 3
COEF CRITIQUE = 5.807

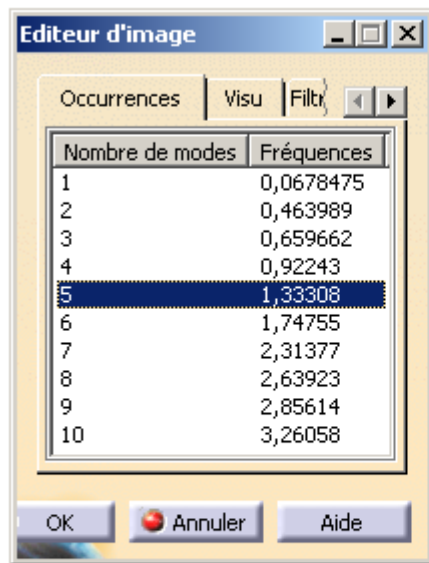
FLAMBEMENT - MODE 4
COEF CRITIQUE = -6.974

FLAMBEMENT - MODE 5
COEF CRITIQUE = 11.112

modes de flambement (ferrure-solides3)







Nombre de modes	Fréquences
1	0,0678475
2	0,463989
3	0,659662
4	0,92243
5	1,33308
6	1,74755
7	2,31377
8	2,63923
9	2,85614
10	3,26058

Noeud 3

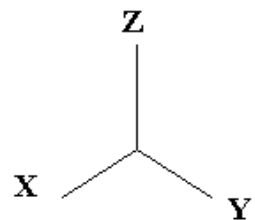
Déplacement nodal :
 $dx = 0.00000$ $dy = 0.00000$ $dz = 0.00000$ (mm)
 $rotx = 0.00000$ $roty = 0.00000$ $rotz = 0.00000$ (rad)

Action(s) de liaison :
 $Rx = -13.1$ $Ry = 3695.9$ $Rz = -7536.3$ (N)
 $Mx = 12953.2$ $My = 1568.5$ $Mz = 731.7$ (N.mm)

Noeud 4

Déplacement nodal :
 $dx = 0.00000$ $dy = 0.00000$ $dz = 0.00000$ (mm)
 $rotx = 0.00000$ $roty = 0.00000$ $rotz = 0.00000$ (rad)

Action(s) de liaison :
 $Rx = 13.1$ $Ry = 1904.1$ $Rz = 7536.8$ (N)
 $Mx = 16234.3$ $My = -1568.5$ $Mz = 374.2$ (N.mm)



Noeud 1

Force nodale
 $Fx = 0.0$ $Fy = -5600.0$ $Fz = 0.0$ N

Noeud 1

Déplacement nodal :
 $dx = 0.06266$ $dy = -0.53252$ $dz = -0.04341$ (mm)
 $rotx = -0.00597$ $roty = -0.00047$ $rotz = 0.00000$ (rad)

[Noeud libre]

RDM6 ; fichier ferrure-barre.por

Noeud 3

Déplacement nodal :

$dx = 0.00000$ $dy = 0.00000$ $dz = 0.00000$ [mm]
 $rotx = -0.00394$ $roty = 0.00000$ $rotz = 0.00000$ [rad]

Action(s) de liaison :

$Rx = 0.0$ $Ry = 3762.0$ $Rz = -7881.5$ [N]
 $Mx = 0.0$ $My = -0.1$ $Mz = -0.0$ [N.mm]

Noeud 4

Déplacement nodal :

$dx = 0.00000$ $dy = 0.00000$ $dz = 0.00000$ [mm]
 $rotx = -0.00433$ $roty = 0.00000$ $rotz = 0.00000$ [rad]

Action(s) de liaison :

$Rx = -0.0$ $Ry = 1838.0$ $Rz = 7882.0$ [N]
 $Mx = 0.0$ $My = 0.1$ $Mz = -0.0$ [N.mm]

Noeud 1

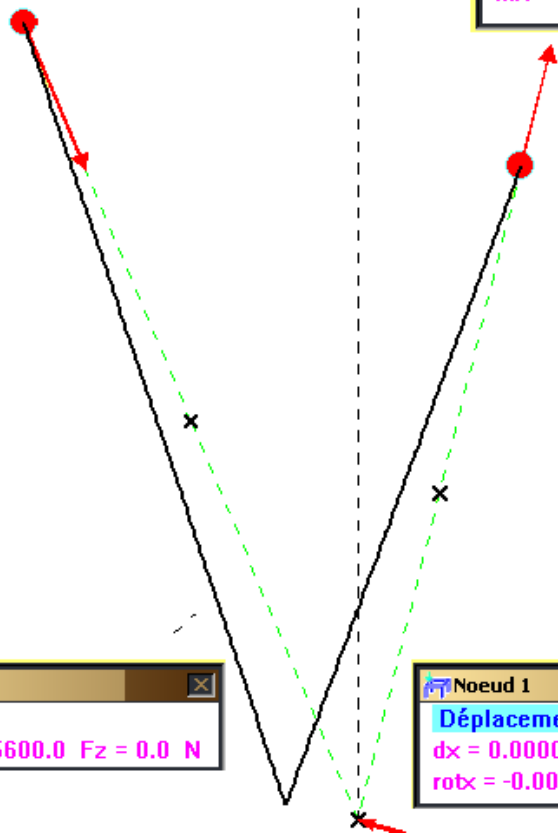
Force nodale

$Fx = 0.0$ $Fy = -5600.0$ $Fz = 0.0$ N

Noeud 1

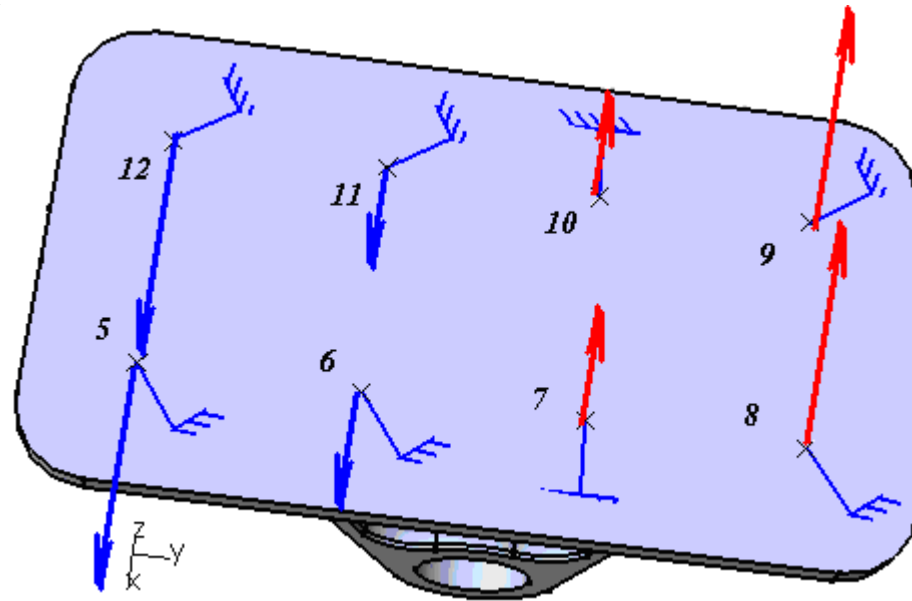
Déplacement nodal :

$dx = 0.00006$ $dy = -0.55428$ $dz = -0.04526$ [mm]
 $rotx = -0.00433$ $roty = -0.00000$ $rotz = 0.00000$ [rad]



CATIA V5 (fichier ferrure-solide3)

Calcul très pénalisant vu que la traverse ne reprend pas l'action de la semelle de la ferrure



Représentation des efforts générant de la traction et de la compression (ne peut exister car semelle)

Résultats CATIA V5,

Commentaires

Moments / au centre géométrique de chaque liaison rotule

X	Y	Z	L	M	N
-3495,561	203,651	-3383,954	-5,67E-06	-7,52E-06	5,40E-06
-880,973	1224,012	-98,929	-3,37E-06	-2,36E-06	8,96E-07
1155,215	1207,168	116,651	-3,31E-06	3,10E-06	7,37E-07
3489,529	-167,648	3374,091	-1,74E-06	7,51E-06	2,17E-06
-3859,679	110,466	4295,011	-3,10E-06	-1,07E-05	-2,51E-06
-842,448	1558,704	177,423	-4,27E-06	-2,31E-06	3,46E-08
1006,892	1434,527	-263,466	-3,98E-06	2,77E-06	-1,37E-07
3427,026	29,12	-4189,863	-6,40E-06	9,49E-06	-5,171e-06
0,001	5600	26,964	-3,1843E-05	-7E-09	6,58744E-06

Vérification de l'équilibre général (rappel mip hyperstatique)

Les forces :

/X =0 normal pas de chargement sur X;

/Y= 5600 normal chargement sur Y =-5600 ;

/Z =26.964 : anormal !

Les moments : calculés au noeud de chaque encastrement (rotule) donc valeurs très faibles résiduelles (normalement nulles), donc l'équilibre général ne peut être vérifié

Moments rapport au point O origine du modèle

X	Y	Z	L	M	N
-3495,561	203,651	-3383,954	170,344	-349,064	-196,97
-880,973	1224,012	-98,929	-142,813	-102,88	-1,127
1155,215	1207,168	116,651	-143,653	135,164	23,869
3489,529	-167,648	3374,091	116,954	348,541	-103,637
-3859,679	110,466	4295,011	110,334	-406,782	109,613
-842,448	1558,704	177,423	-185,486	-98,082	-19,06
1006,892	1434,527	-263,466	-163,134	116,598	11,407
3427,026	29,12	-4189,863	237,454	356,583	196,699
0,001	5600	26,964	0	0,078	20,794

Vérification de l'équilibre général

Les forces :

/X =0 normal pas de chargement sur X;

/Y= 5600 normal chargement sur Y =-5600 ;

/Z =26.964 : dans l'alésage maillage non symétrique par rapport au plan médian, il faudrait mailler + finement

Les moments :

Le chargement induit un moment porté par X par rapport au plan d'appui de la semelle

A la lecture des résultats où se trouve l'origine du repère global ? au centre de l'alésage !

/X=0 : normal, le chargement sur Y passant par O n'induit pas de moment/O, donc somme des moments/O dans les boulons /X =0

/Y=0 ; chargement sur Y ne peut pas induire des moments /Y

/Z= 20,794, (anormal !)

