# SSNL135 – Détermination des charges de ruine de la console MEKELEC

**Résumé**

Dans ce test, on cherche à valider dans le domaine non-linéaire géométrique et matériau l'élément de poutre de Timoshenko multi-fibres, disponible dans *Code_Aster via* la modélisation POU_D_TGM. Pour illustrer les possibilités offertes par cet élément, on se propose de déterminer numériquement les charges de ruine de la console de pylône dite MEKELEC et de les comparer à des résultats d'essais.

La console MEKELEC est soumise à différents cas de charge et pour chaque cas, on compare la charge de ruine et le mode de ruine prédits à ceux observés lors des essais. Les résultats montrent une très bonne prédiction des modes de ruine avec, cependant, une disparité sur les charges qui s'explique plus par la modélisation simplifiée adoptée pour la console que par des lacunes de l'élément fini utilisé.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# Table des matières

## Table des Matières

1 Problème de référence....3
1.1 Géométrie de la structure....3
1.2 Caractéristiques des cornières utilisées....3
1.3 Propriétés du matériau....4
1.4 Conditions aux limites et chargement....4
2 Solution de référence....5
2.1 Méthode utilisée pour le calcul de la solution de référence....5
2.2 Résultats de référence....5
2.3 Incertitude sur la solution....5
2.4 Références bibliographiques....5
3 Modélisation A....6
3.1 Caractéristiques de la modélisation....6
3.2 Caractéristiques du maillage....6
3.3 Caractéristiques de la section transverse (fibres)....6
3.4 Grandeurs testées et résultats....6
3.4.1 Valeurs testées....6
3.4.2 Résultats graphiques de la modélisation A....7
3.4.3 Remarques....7
4 Modélisation B....8
4.1 Caractéristiques de la modélisation....8
4.2 Caractéristiques du maillage....8
4.3 Caractéristiques de la section transverse (fibres)....8
4.4 Grandeurs testées et résultats....8
4.4.1 Valeurs testées....8
4.4.2 Résultats graphiques de la modélisation B....9
4.4.3 Remarques....9
4.4.4 Comparaison des modes de ruine....9
5 Modélisation C....11
5.1 Caractéristiques de la modélisation....11
5.2 Caractéristiques du maillage....11
5.3 Caractéristiques de la section transverse (fibres)....11
5.4 Grandeurs testées et résultats....11
5.4.1 Valeurs testées....11
5.4.2 Résultats graphiques de la modélisation C....12
5.4.3 Remarques....12
6 Synthèse des résultats....13



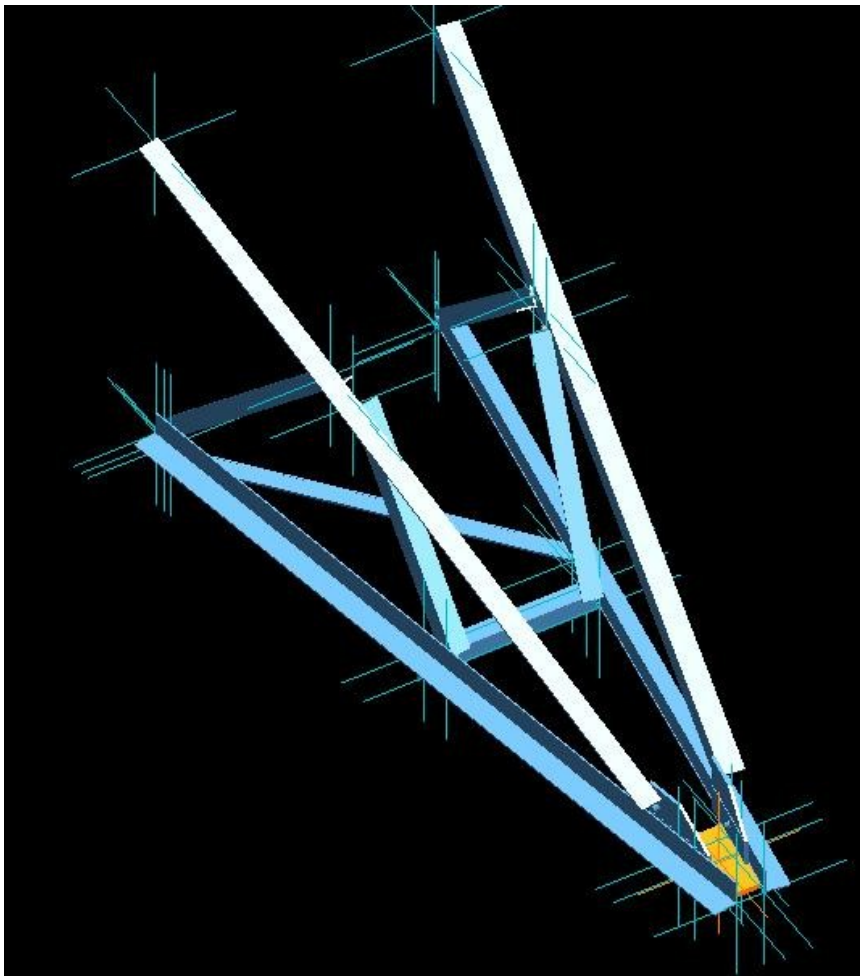
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 1 Problème de référence

## 1.1 Géométrie de la structure

On étudie la console MEKELEC. Il s'agit d'une console de pylône P4T, dont les dimensions ont été réduites pour faciliter l'instrumentation des essais tout en conservant une structure dont les modes de ruine peuvent être variés et couvrent ceux rencontrés dans un pylône treillis réel.

La structure est composée de 10 cornières assemblées sur leurs ailes avec des boulons, ou par l'intermédiaire de goussets. On pourra se référer à [3] pour des plans détaillés de la console.



## 1.2 Caractéristiques des cornières utilisées

Les cornières utilisées dans la console MEKELEC sont des profilés standards de la construction métallique. L'unité de base pour les grandeurs ci-dessous est le mètre.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

| Poutres | $AE45\times3$ | $AE40\times4$ | $AE35\times3.5$ |
|---|---|---|---|
| $A$ | 2.638081e-04 | 3.077706e-04 | 2.344277e-04 |
| $IY$ | 8.013486e-08 | 7.077171e-08 | 4.210543e-08 |
| $IZ$ | 2.087844e-08 | 1.855685e-08 | 1.095197e-08 |
| $AY$ | 2.419087e+00 | 2.394947e+00 | 2.359465e+00 |
| $AZ$ | 2.207830e+00 | 2.118989e+00 | 2.163107e+00 |
| $JX$ | 8.404596e-10 | 1.784041e-09 | 9.865361e-10 |
| $JG$ | 1.243656e-13 | 1.871860e-13 | 8.685007e-14 |
| $EY$ | 1.459718e-02 | 1.233794e-02 | 1.108092e-02 |
| $IYR2$ | 6.307966e-10 | 4.829759e-10 | 2.482771e-10 |

Les grandeurs $EZ$ et $IZR2$ sont nulles pour tous les poutres.

## 1.3 Propriétés du matériau

Un seul matériau est utilisé, c'est de l'acier $E24$. Lors de tests préliminaires aux essais, les caractéristiques réelles de l'acier utilisé ont pu être mesurées, permettant d'adapter les valeurs des différents paramètres matériaux. Ci-dessous figurent les caractéristiques utilisées dans le calcul :

$$E = 210000\ MPa$$
$$\nu = 0.3$$
$$\sigma_e = 300\ Mpa$$
$$E_t = 1000\ Mpa$$

## 1.4 Conditions aux limites et chargement

1) Des conditions aux limites sont imposées aux points $A$, $B$, $C$, $D$ :

$$DX = DY = DZ = DRX = DRY = 0$$

Pour simuler la flexibilité des goussets pliés utilisés aux points d'accrochage, on laisse la rotation autour de $Z$ libre.

2) Trois types de cas de chargement sont possibles (cf. figure pour les points $P$ et $Q$) :

$C1$ : $FZ = 1.0\times t$ en $P$
$C2$ : $FZ = -1.0\times t$ en $P$
$C3$ : $FY = 1.0\times t$ en $Q$

Remarque : le but du cas-test est ici de déterminer le pseudo-temps $t$ correspondant à la ruine, c'est à dire la force maximale admissible par la structure. C'est une tangente horizontale dans la réponse de la structure (courbe force-déplacement au point d'application de la force).



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 2 Solution de référence

## 2.1 Méthode utilisée pour le calcul de la solution de référence

La solution de référence a été obtenue par instrumentation lors d'essais sur une reproduction de la console MEKELEC[1]. La charge de ruine est celle pour laquelle il se produit un déplacement très important du point d'application de la force sans qu'il soit possible d'arriver à un état d'équilibre (évolution non quasi-statique de la structure).

Dans tous les cas, la structure a été déchargée entièrement à 40% et 80% de la charge de conception pour éviter que les jeux dans les assemblages ne viennent perturber la charge de ruine.

## 2.2 Résultats de référence

Les charges de ruine déterminées durant les essais sont présentées pour chacun des cas de charge :

| Cas de charge | Charge de ruine ( $kN$ ) | Mode associé |
|---|---|---|
| *C1* | 49.9 | Plastification en nez de console |
| *C2* | 32.4 | Flambement des membrures supérieures |
| *C3* | 16.2 | Plastification en nez de console |

## 2.3 Incertitude sur la solution

Résultats expérimentaux.

## 2.4 Références bibliographiques

[1] PENSERINI P. : « Résultats des essais de la console MEKELEC de 1991 à 1993 », Note EDF DER, HM-77/93/262, 1993.

[2] PENSERINI P. : « Simulation du comportement de la console MEKELEC par le *Code_Aster* », Note EDF DER, HM-77/94/407, 1994.

[3] PENSERINI P. : « Essais d'investigation du comportement de la structure-test Mékélec de type console de pylône P4T», Document Technique EDF DER, HM-72/5917, 1991.

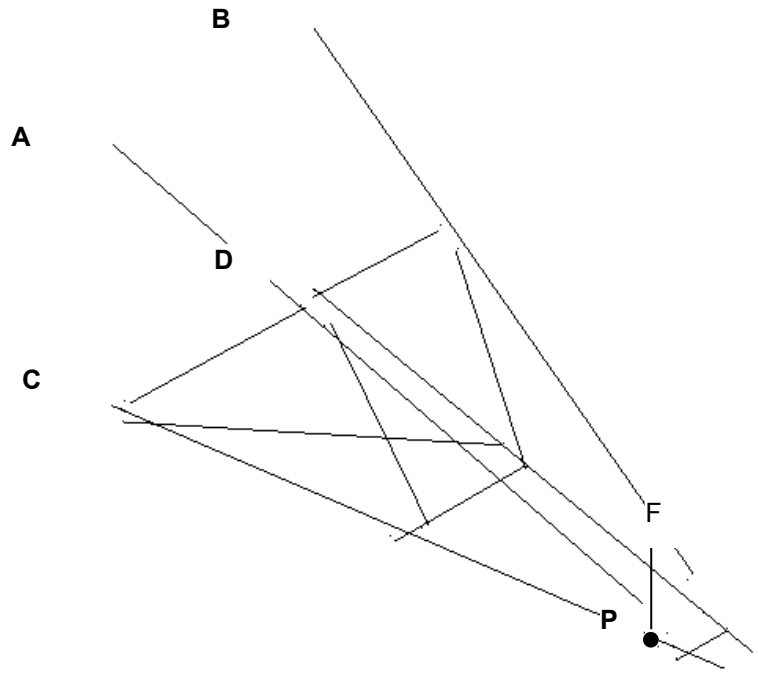


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 3 Modélisation A

## 3.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation POU_D_TGM (140 éléments) / DIS_TR (22 éléments)




La modélisation des assemblages boulonnés est assurée par des discrets dont les raideurs sont fixées de manière forfaitaire. Les excentrements des points d'attache sont pris en compte (ce qui explique que les éléments ne sont pas concourants). Le modèle est obtenu à partir du pré-processeur EVEREST.

Le cas de charge est le premier ( $C1$ ).

## 3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 191
Nombre de mailles et types : 162 SEG2 (dont 22 de longueur nulle pour les discrets)

## 3.3 Caractéristiques de la section transverse (fibres)

Nombre de fibres : 40 (découpage en 2 dans l'épaisseur et en 10 dans la longueur des ailes)

## 3.4 Grandeurs testées et résultats

### 3.4.1 Valeurs testées

La valeur testée est la charge de ruine estimée pour la structure. Comme les résultats de référence sont expérimentaux, on assortit les comparaisons de tests de non-régression. La charge de ruine pour le calcul est définie comme étant la valeur maximale prise par l'effort appliqué à la structure.

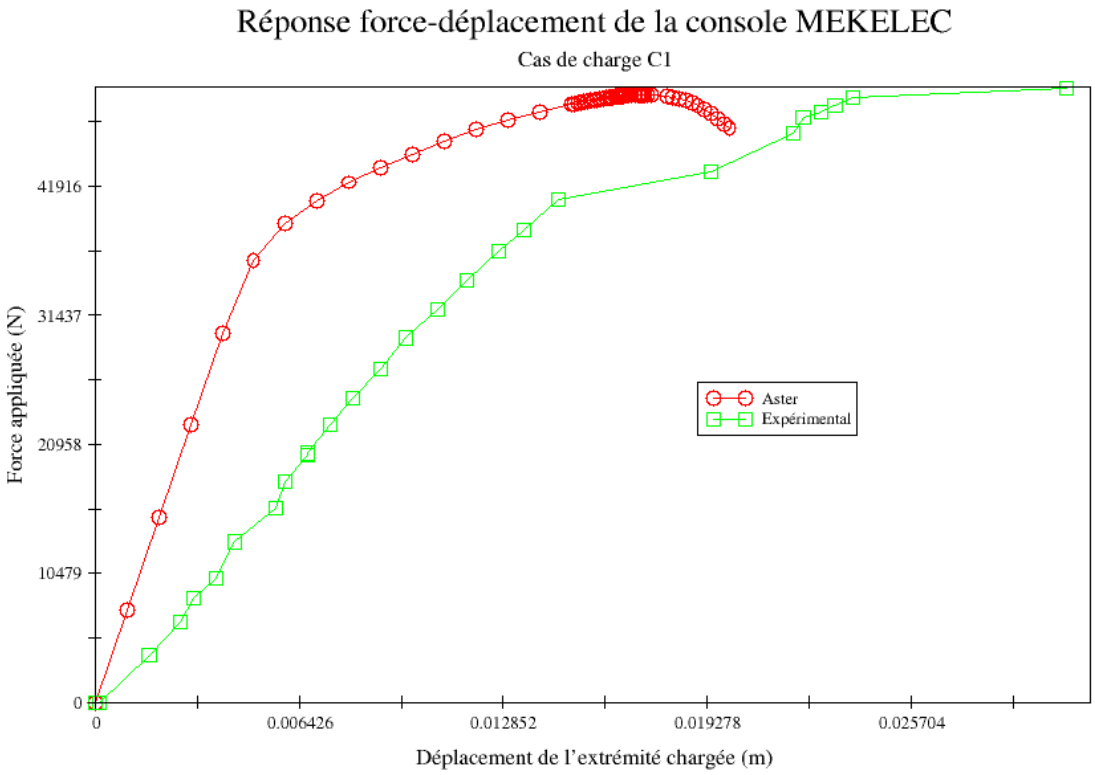


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

*Rappel : on pilote la structure en déplacement, on observe donc un adoucissement.*

| Cas de charge | Référence | Type de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| C1 | 49.9 | 'SOURCE_EXTERNE' | 10 % |

### 3.4.2 Résultats graphiques de la modélisation A




### 3.4.3 Remarques

La réponse numérique de la structure est obtenue par un pilotage en déplacement du nœud chargé, cela permet d'observer l'adoucissement dû à la ruine et donc de pouvoir tester la valeur maximale de l'état de pilotage (paramètre ETA_PILOTAGE).

La charge de ruine pour ce cas de charge est correctement estimée, cependant on remarque que la réponse expérimentale et la réponse numérique diffèrent largement, notamment à cause d'une pente élastique largement surestimée dans le calcul *Aster* . La rigidité de la structure n'est en effet pas bien retranscrite dans le modèle : les goussets qui permettent d'assurer les assemblages en tête et en pied de console sont supposés avoir un comportement rigide alors que ce sont des plaques.

On peut cependant observer que l'allure globale des réponses expérimentale et numérique est la même avec une bonne description du changement de pente (plastification en tête de console) puis de la charge limite (tangente horizontale à la courbe force-déplacement).

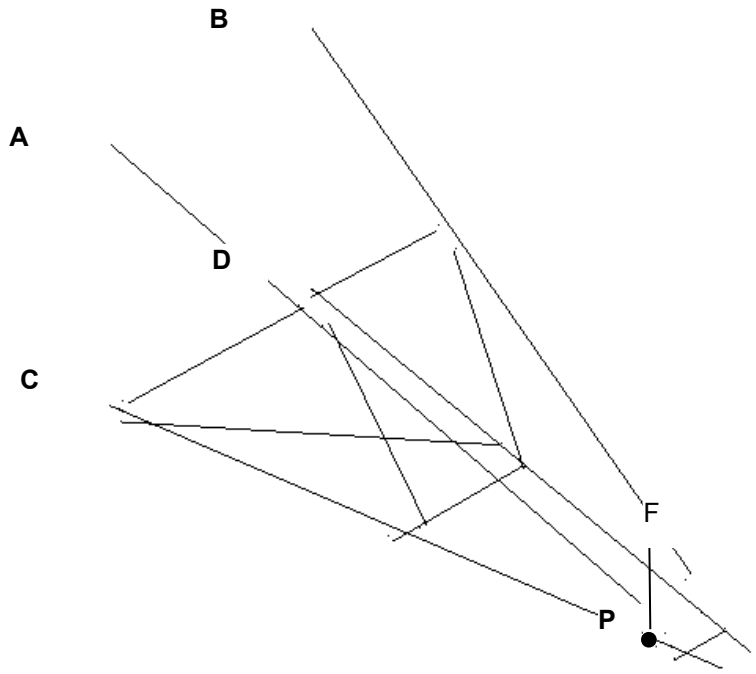


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 4 Modélisation B

## 4.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation POU_D_TGM (140 éléments) / DIS_TR (22 éléments)




La modélisation des assemblages boulonnés est assurée par des discrets dont les raideurs sont fixées de manière forfaitaire. Les excentrements des points d'attache sont pris en compte (ce qui explique que les éléments ne sont pas concourants). Le modèle est obtenu à partir du pré-processeur EVEREST.

Le cas de charge est le second ( $C2$ ).

## 4.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 191
Nombre de mailles et types : 162 SEG2 (dont 22 de longueur nulle pour les discrets)

## 4.3 Caractéristiques de la section transverse (fibres)

Nombre de fibres : 40 (découpage en 2 dans l'épaisseur et en 10 dans la longueur des ailes)

## 4.4 Grandeurs testées et résultats

### 4.4.1 Valeurs testées

La valeur testée est la charge de ruine estimée pour la structure. Comme les résultats de référence sont expérimentaux, on assortit les comparaisons de tests de non-régression. La charge de ruine pour le calcul est définie comme étant la valeur maximale prise par l'effort appliqué à la structure.
Le caractère injectif de la courbe force-déplacement nous donne la possibilité de la tester en non-regression pour les différentes valeurs de paramètre ETA_PILOTAGE.

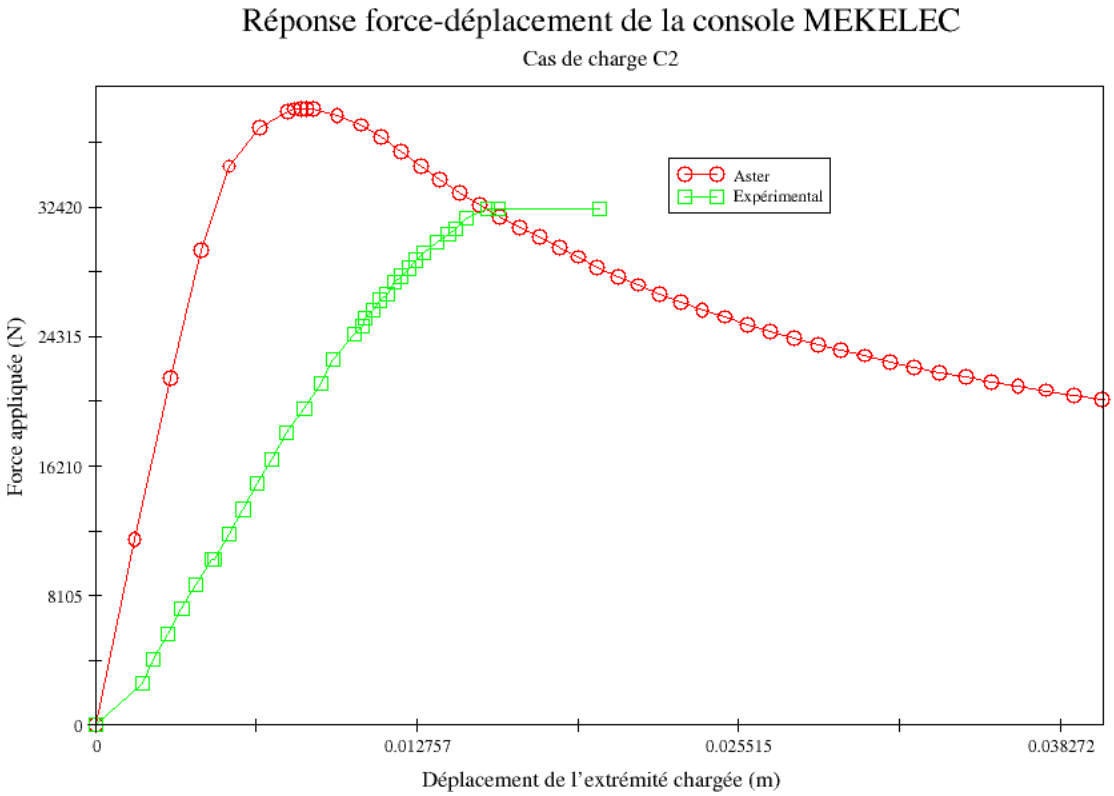


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

*Rappel : on pilote la structure en longueur d'arc, on observe donc un adoucissement.*

| Cas de charge | Référence | Type de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| C2 | 32.4 | 'SOURCE_EXTERNE' | 30 % |

### 4.4.2 Résultats graphiques de la modélisation B




### 4.4.3 Remarques

La réponse numérique de la structure est obtenue par un pilotage en longueur d'arc de toute la structure, cela permet d'observer l'adoucissement dû à la ruine et donc de pouvoir tester la valeur maximale de l'état de pilotage (paramètre ETA_PILOTAGE).

La charge de ruine pour ce cas de charge est surestimée à hauteur de 20%. La rigidité de la structure est là encore trop importante par rapport au modèle réel : les goussets qui permettent d'assurer les assemblages en tête et en pied de console sont supposés avoir un comportement rigide alors que ce sont des plaques.

À la différence de la modélisation précédente, cela a pour effet de donner une charge limite erronée. En effet, les essais ont montré l'importance des non-linéarités géométriques (ruine par flambage élasto-plastique des cornières du panneau supérieur), il n'y a pas de redistribution d'efforts suite à une plastification, la ruine est brutale. L'adoucissement est concomitant avec la fin de la pente élastique.

### 4.4.4 Comparaison des modes de ruine



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

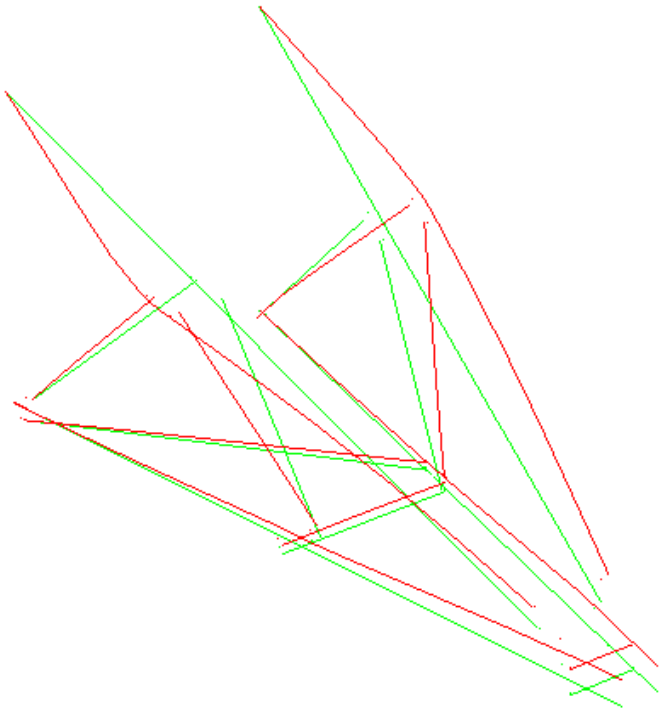


**Figure 4.4.4-a : Mode de ruine prédit par le calcul en configuration C2 (amplitude 1)**

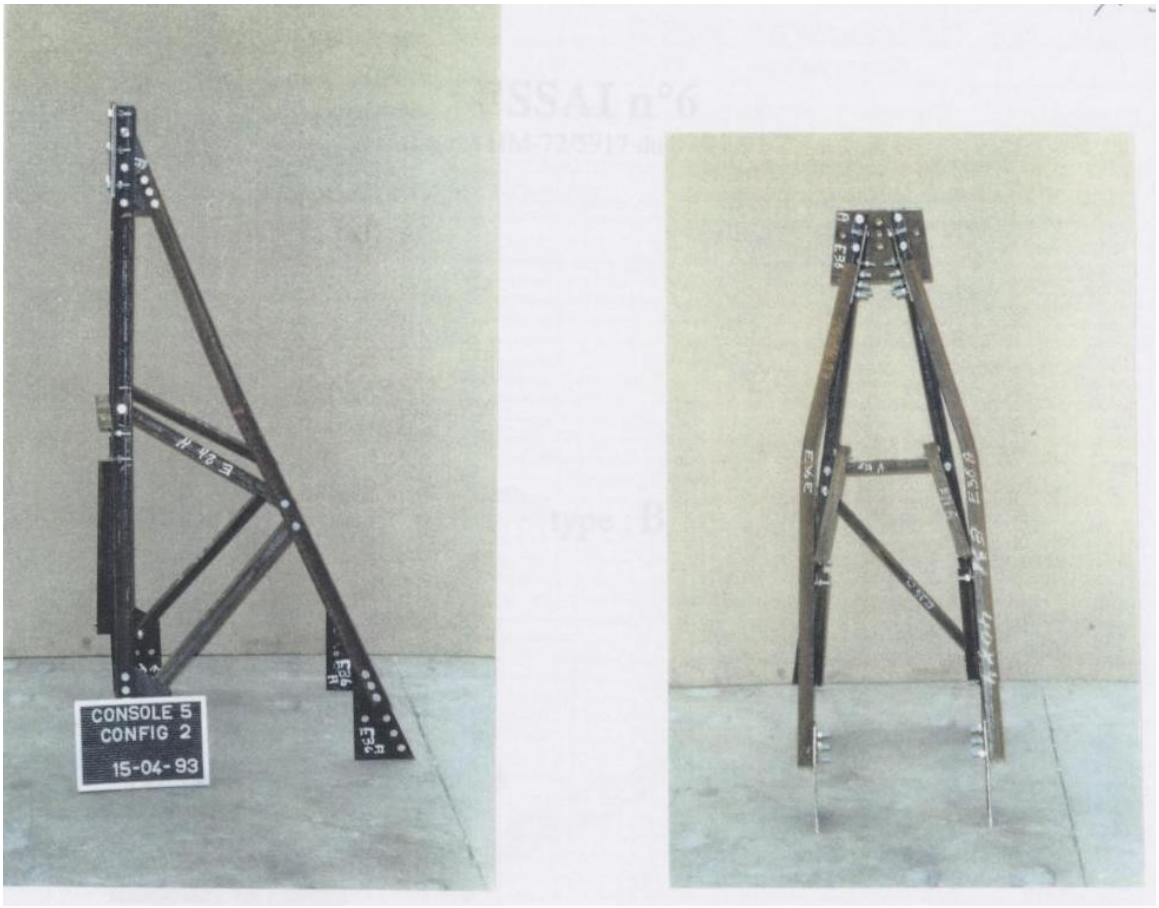



**Figure 4.4.4-b : Mode de ruine observé lors des essais en configuration C2**

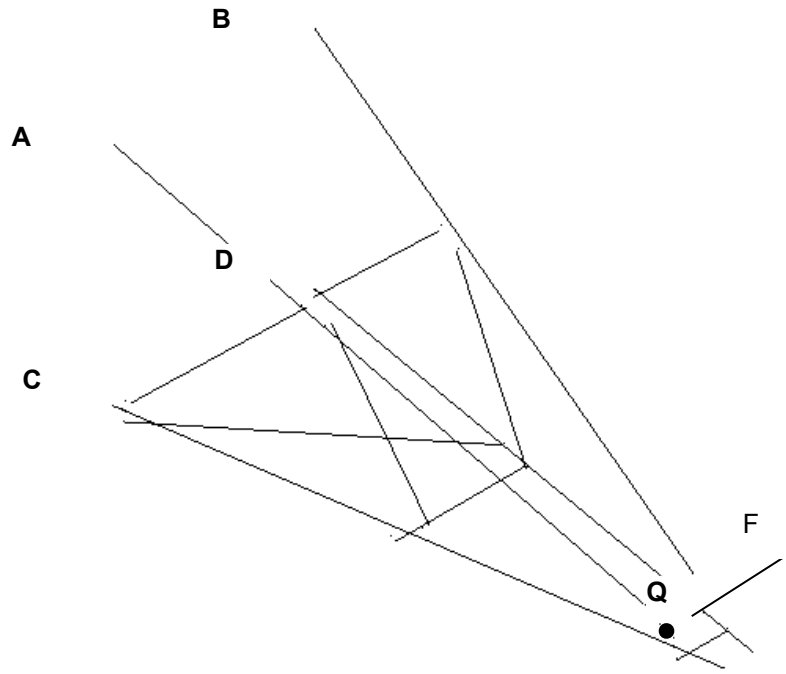


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 5 Modélisation C

## 5.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation POU_D_TGM (140 éléments) / DIS_TR (22 éléments)




La modélisation des assemblages boulonnés est assurée par des discrets dont les raideurs sont fixées de manière forfaitaire. Les excentrements des points d'attache sont pris en compte (ce qui explique que les éléments ne sont pas concourants). Le modèle est obtenu à partir du pré-processeur EVEREST.

Le cas de charge est le troisième ( $C3$ ).

## 5.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 191
Nombre de mailles et types : 162 SEG2 (dont 22 de longueur nulle pour les discrets)

## 5.3 Caractéristiques de la section transverse (fibres)

Nombre de fibres : 40 (découpage en 2 dans l'épaisseur et en 10 dans la longueur des ailes)

## 5.4 Grandeurs testées et résultats

### 5.4.1 Valeurs testées

La valeur testée est la charge de ruine estimée pour la structure. Comme les résultats de référence sont expérimentaux, on assortit les comparaisons de tests de non-régression. La charge de ruine pour le calcul est définie comme étant la valeur maximale prise par l'effort appliqué à la structure.
Le caractère injectif de la courbe force-déplacement nous donne la possibilité de la tester en non-regression pour les différentes valeurs de paramètre ETA_PILOTAGE.

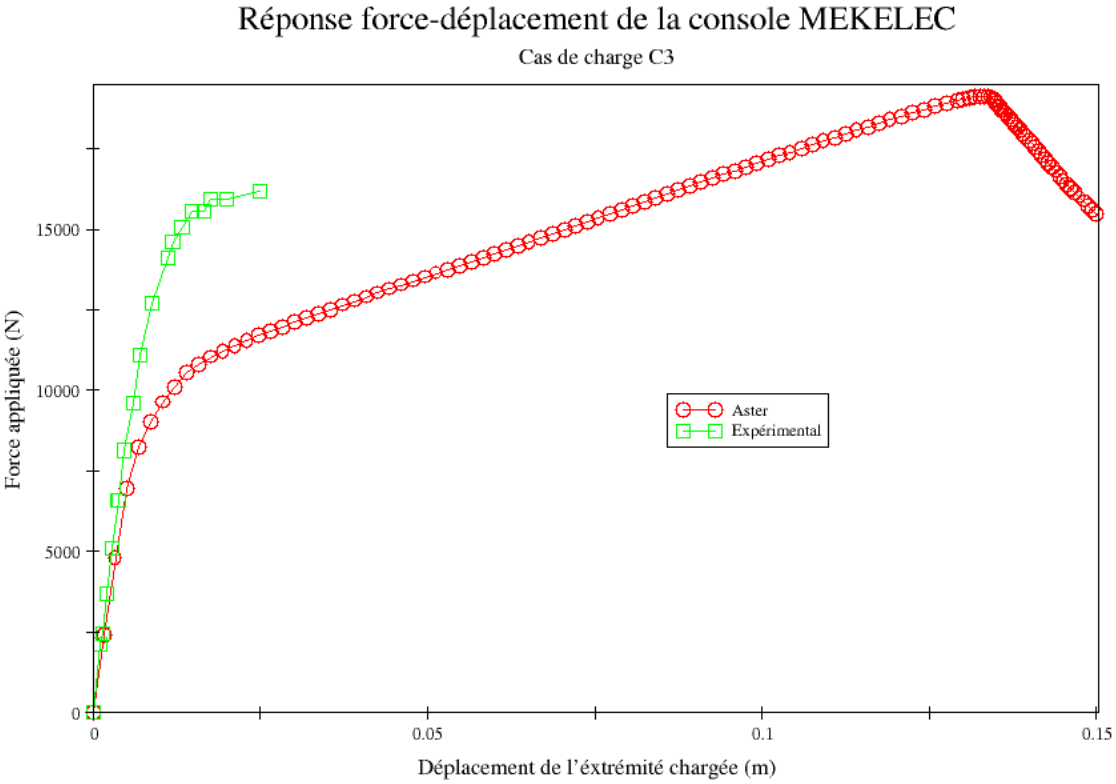


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

*Rappel : on pilote la structure en longueur d'arc, on observe donc un adoucissement.*

| Cas de charge | Référence | Type de référence | Tolérance |
|---|---|---|---|
| C3 | 16.2 | 'SOURCE_EXTERNE' | 20 % |

### 5.4.2 Résultats graphiques de la modélisation C




### 5.4.3 Remarques

La réponse numérique de la structure est obtenue par un pilotage en longueur d'arc de toute la structure, cela permet d'observer l'adoucissement dû à la ruine et donc de pouvoir tester la valeur maximale de l'état de pilotage (paramètre ETA_PILOTAGE).

La charge de ruine pour ce cas de charge est surestimée à hauteur de 20%. Cette fois-ci la pente élastique est pourtant en bon accord avec l'expérience. On peut ici douter de la charge limite obtenue en essais : par rapport aux autres cas de charge, la ruine est nettement moins marquée (pas de déplacement important à la fin), et on peut penser qu'il aurait été possible de tirer encore sur la structure.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 6 Synthèse des résultats

L'élément de poutre multi-fibres POU_D_TGM utilisable en non-linéaire géométrique et matériau permet dans ce cas-test de simuler le comportement d'une console de pylône jusqu'au premier adoucissement et plus loin si l'on pilote la structure en déplacement (dans le cas d'une ruine par plastification) ou par longueur d'arc (dans le cas d'une ruine par flambement).

Le calcul est rapide et ne demande aucun ajustement pour le mener à bien (si ce n'est la mise en place du pilotage). Les résultats, s'ils diffèrent de l'expérience, ne remettent pas en cause les performances de l'élément. En effet, les disparités observées sont à mettre sur le compte du choix de la modélisation (des assemblages notamment).



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)