

## SSNV503 - Patin glissant sur un plan rigide

---

### Résumé :

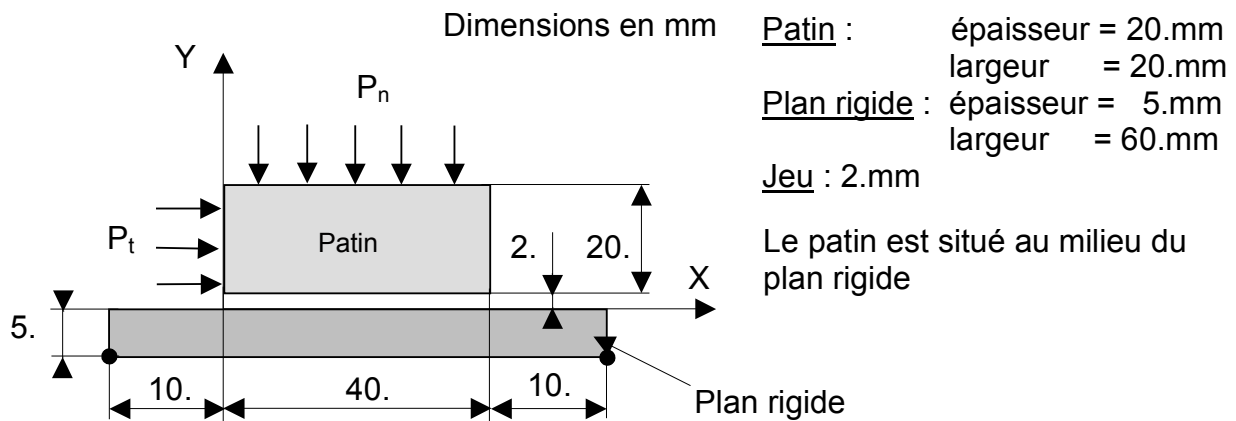
Ce test représente un calcul de contact d'un patin glissant sur un plan rigide. L'objectif de ce test est de permettre de valider de manière certaine le calcul du critère de Coulomb et la bonne transmission de la pression.

Les différentes modélisations de la zone de contact testées sont les suivantes :

- **Modélisation A** (2D) : contact nœud-maille, méthode lagrangienne pour le contact et le frottement, jeu géométrique.
- **Modélisation B** (2D) : contact nœud-maille avec méthode lagrangienne et jeu défini par une fonction.
- **Modélisation C** (2D) : contact nœud-maille, méthode lagrangienne pour le contact et pénalisée pour le frottement, jeu géométrique.
- **Modélisation D** (2D) : contact nœud-maille, méthode pénalisée pour le contact et le frottement, jeu géométrique.
- **Modélisation E** (3D) : contact nœud-maille, méthode lagrangienne pour le contact et pénalisée pour le frottement, jeu géométrique.
- **Modélisation F** (3D) : contact nœud-maille, méthode lagrangienne pour le contact et pénalisée pour le frottement, jeu défini par une fonction.
- **Modélisation G** (3D) : contact nœud-maille, méthode pénalisée pour le contact et le frottement, jeu géométrique.
- **Modélisation H** (2D) : contact nœud-maille, méthode continue pour le contact et le frottement, jeu géométrique.
- **Modélisation I** (3D) : contact nœud-maille, méthode continue pour le contact et le frottement, jeu géométrique.
- **Modélisation J** (2D) : contact par éléments de joint, loi JOINT\_MECA\_FROT

## 1 Problème de référence

### 1.1 Géométrie



### 1.2 Propriétés du matériau

Patin :  
 $E = 2.1106 \text{ N/mm}^2$       Module d'young  
 $\nu = 0$                       Coefficient de poisson

Plan rigide par conditions cinématiques.

Zone de contact:

$\mu = 0.3$                       Coefficient de frottement

### 1.3 Conditions aux limites et chargements

Conditions aux limites :

- Tous les nœuds du plan rigide sont encastrés.

3 cas de chargement :

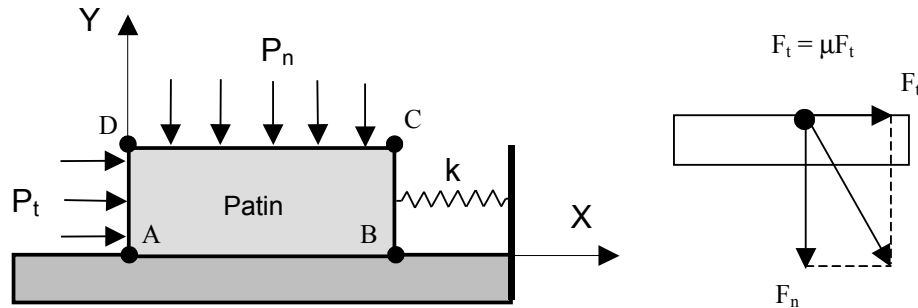
- Pression normale  $P_n = 300 \text{ N/mm}^2$
- Pression normale  $P_n = 300 \text{ N/mm}^2$  et pression tangentielle  $P_t = 178.2 \text{ N/mm}^2$
- Pression normale  $P_n = 300 \text{ N/mm}^2$  et pression tangentielle  $P_t = 181.8 \text{ N/mm}^2$

### 1.4 Conditions initiales

Aucune.

## 2 Solution de référence

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



Hypothèse de calcul : On néglige la déformation du patin.

**Chargement 1 – Pression normale**  $P_n: 300\text{N/mm}^2$

On vérifie :

1. La bonne transmission des efforts normaux au niveau de la zone de contact : la pression normale au niveau de la zone de contact est égale à la pression appliquée ( $P_n = P_n^{\text{contact}}$ )
2. Que le déplacement vertical du patin au niveau de la zone de contact  $AB$  est égal au jeu.

**Chargement 2 – Pression normale**  $P_n: 300\text{N/mm}^2$  **et pression tangentielle**  $P_t = 178.2\text{N/mm}^2$

C'est une situation d'adhérence. On vérifie que les nœuds du patin situés dans la zone de glissement

(  $AB$  ) ne se déplacent pas tangentiellement :  $P_t = \frac{\mu P_n S_{CD}}{S_{AD}} 0.99$

**Chargement 3 – Pression normale**  $P_n: 300\text{N/mm}^2$  **et pression tangentielle**  $P_t = 181.8\text{N/mm}^2$

C'est une situation de glissement. On vérifie que les nœuds du patin situés dans la zone de

glissement (  $AB$  ) se déplacent de 9mm suivant  $X$  :  $P_t = \frac{\mu P_n S_{CD}}{S_{AD}} 1.01$

Détermination de la raideur  $k$  du ressort : on veut déterminer la raideur du ressort en fonction du déplacement souhaité. Au moment du glissement, la force dans le ressort est de :

$$F_r = F_t - \mu F_n = 0,01 \mu F_n \quad \text{avec } ( F_t = 181.8 \times 20, F_n = 300 \times 40 )$$

|                           |   |                        |
|---------------------------|---|------------------------|
| $F_r = K U_t$             | : | force dans le ressort  |
| $F_t = P_t \times S_{AD}$ | : | force tangentielle     |
| $F_n = P_n \times S_{CD}$ | : | force normale          |
| $U_t$                     | : | déplacement tangentiel |
| $S_{AD}$                  | : | surface                |
| $S_{DC}$                  | : | surface                |

Pour un déplacement de 9. mm la rigidité  $k$  du ressort doit-être de  $0.01 \mu F_n / 9 = 4 \text{ N/mm}$

## 2.2 Résultats de référence

- **Chargement 1 (Pression normale  $P_n$ ) :**  $P_n^{contact} = 300\text{N/mm}^2$
- **Chargement 2 ( $P_n$  :  $300\text{N/mm}^2$  et  $P_t = 178.2\text{N/mm}^2$ ) :** on vérifie qu'il existe au moins un nœud de la surface de contact qui ne glisse pas. On teste qu'au moins un des nœuds situés sur la face opposée à l'application du chargement latéral ne glisse pas.
- **Chargement 3 ( $P_n$  :  $300\text{N/mm}^2$  et  $P_t = 181.8\text{N/mm}^2$ ) :** on vérifie que tous les nœuds de la surface de contact glissent. On teste que tous les nœuds situés sur la face opposée à l'application du chargement latéral glissent.

## 2.3 Incertitudes sur la solution

Inférieures à 0,1%

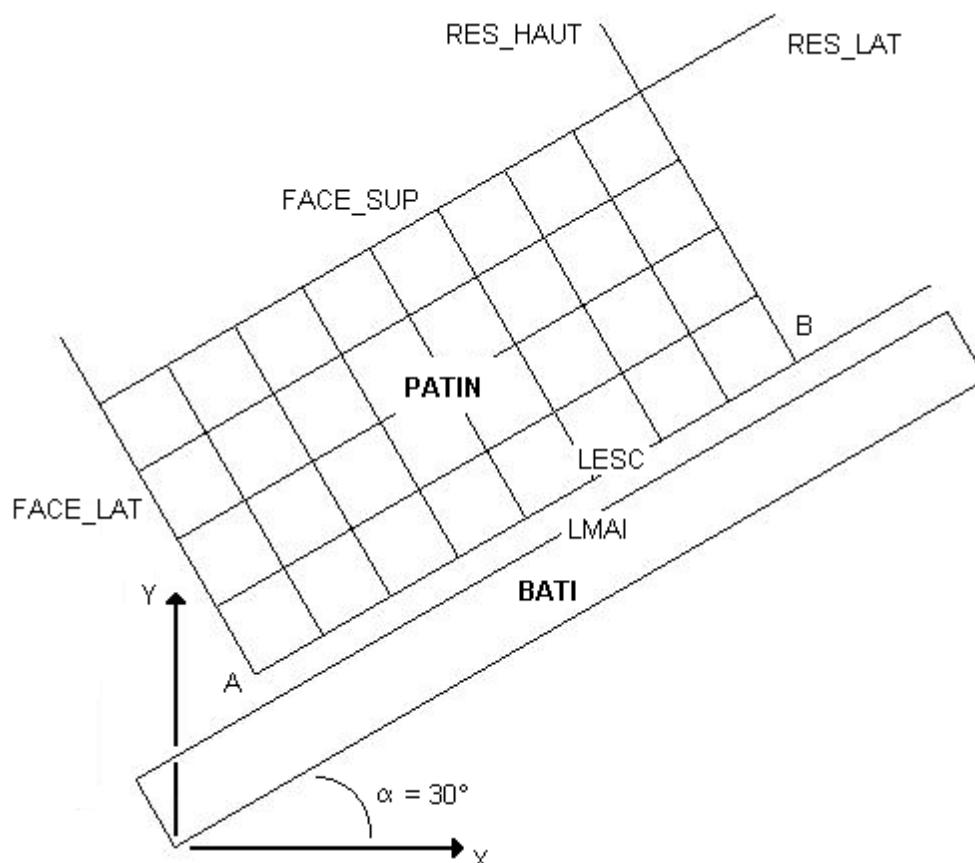
## 2.4 Références bibliographiques

Sans objet

## 3 Modélisation A

### 3.1 Caractéristiques de la modélisation

Une modélisation `D_PLAN` avec des éléments `QUAD4` testant les fonctionnalités de contact nœud-maille avec frottement traité avec la méthode lagrangienne (formulation discrète) a été mise en œuvre.



Le jeu entre le patin et le bâti est défini par les coordonnées géométriques du maillage.

Pour éviter les mouvements de corps rigide, le patin est maintenu par des ressorts de rigidité faible :

RES\_LAT :  $k = 2 \text{ N/mm}$

RES\_HAUT :  $k = 0,005 \text{ N/mm}$

Conditions aux limites :

Extrémité libre des ressorts :  $DX = DY = 0$ .

Bâti :  $DX = DY = 0$ .

## 3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 53

Nombre et types de mailles : 33 QUAD4, 32 SEG2

## 4 Résultats de la modélisation A

### 4.1 Valeurs testées

| Identification                | Référence    | Type           | Tolérance        |
|-------------------------------|--------------|----------------|------------------|
| <b>Chargement 1</b>           |              |                |                  |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00%  |
| Force tangentielle de contact | 0 N          | ANALYTIQUE     | ABSOLU – 5,00%   |
| DX (point A)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DY (point A)                  | –1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DX (point B)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DY (point B)                  | –1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| <b>Chargement 2</b>           |              |                |                  |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00%  |
| Force tangentielle de contact | –3,564E+03 N | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00%  |
| DX (point A)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 2,3 0% |
| DY (point A)                  | –1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DX (point B)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DY (point B)                  | –1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| <b>Chargement 3</b>           |              |                |                  |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00%  |
| Force tangentielle de contact | –3,624E+03 N | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00%  |
| DX (point A)                  | 8,787 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DY (point A)                  | 2,768 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DX (point B)                  | 8,787 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DY (point B)                  | 2,768 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |

### 4.2 Remarques

- Le jeu est défini dans ce cas de manière géométrique. On a la possibilité de le définir via les mots clés DIST\_1 et DIST\_2. Ceci est fait dans le modèle suivant.
- Les pressions normale et tangentielle au niveau de la zone de contact sont vérifiées en testant la force globale de contact dans le sens normal et tangentiel :

$$F_n^{CTAC} = p_n S_{DC} = 300 * 40 * 1 = 12000 N$$

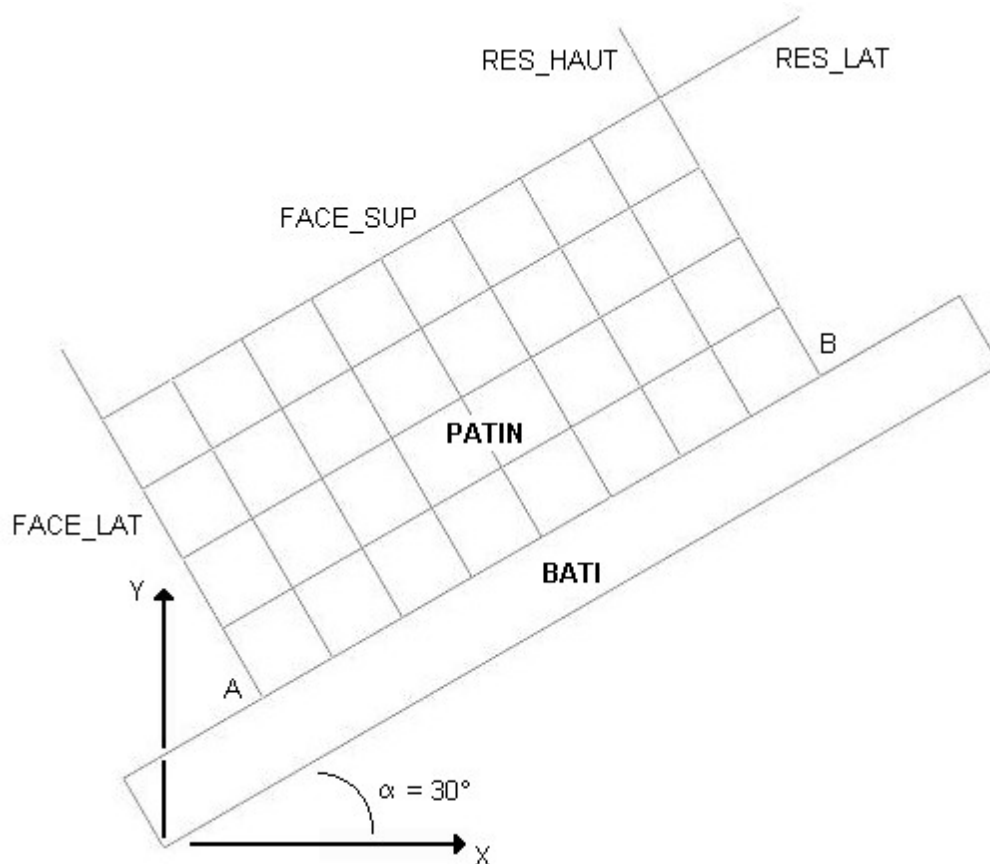
$$F_t^{CTAC} = p_t S_{AD} = 178.2 * 20 * 1 = 35640 N \quad (\text{Chargement 2})$$

$$F_t^{CTAC} = p_t S_{AD} = 181.8 * 20 * 1 = 36240 N \quad (\text{Chargement 3})$$

## 5 Modélisation B

### 5.1 Caractéristiques de la modélisation

Une modélisation D\_PLAN avec des éléments QUAD4 testant les fonctionnalités de contact nœud-maille avec frottement traité avec la méthode lagrangienne a été mise en œuvre.



Le jeu entre le patin et le bâti est défini par une fonction à l'aide du mot clé « DIST\_2 ».

Pour éviter les mouvements de corps rigide, le patin est maintenu par des ressorts de rigidité faible :

RES\_LAT :  $k = 2 \text{ N/mm}$

RES\_HAUT :  $k = 0,005 \text{ N/mm}$

Conditions aux limites :

Extrémité libre des ressorts :  $DX = DY = 0$ .

Bâti :  $DX = DY = 0$ .

### 5.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 53

Nombre et types de mailles : 33 QUAD4 , 32 SEG2

## 6 Résultats de la modélisation B

### 6.1 Valeurs testées

| Identification                | Référence    | Type           | Tolérance        |
|-------------------------------|--------------|----------------|------------------|
| <b>Chargement 1</b>           |              |                |                  |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00%  |
| Force tangentielle de contact | 0 N          | ANALYTIQUE     | ABSOLU – 5,00%   |
| DX (point A)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DY (point A)                  | –1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DX (point B)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DY (point B)                  | –1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| <b>Chargement 2</b>           |              |                |                  |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00%  |
| Force tangentielle de contact | –3,564E+03 N | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00%  |
| DX (point A)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 2,3 0% |
| DY (point A)                  | –1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DX (point B)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DY (point B)                  | –1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| <b>Chargement 3</b>           |              |                |                  |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00%  |
| Force tangentielle de contact | –3,624E+03 N | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00%  |
| DX (point A)                  | 8,787 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DY (point A)                  | 2,768 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DX (point B)                  | 8,787 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |
| DY (point B)                  | 2,768 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00%  |

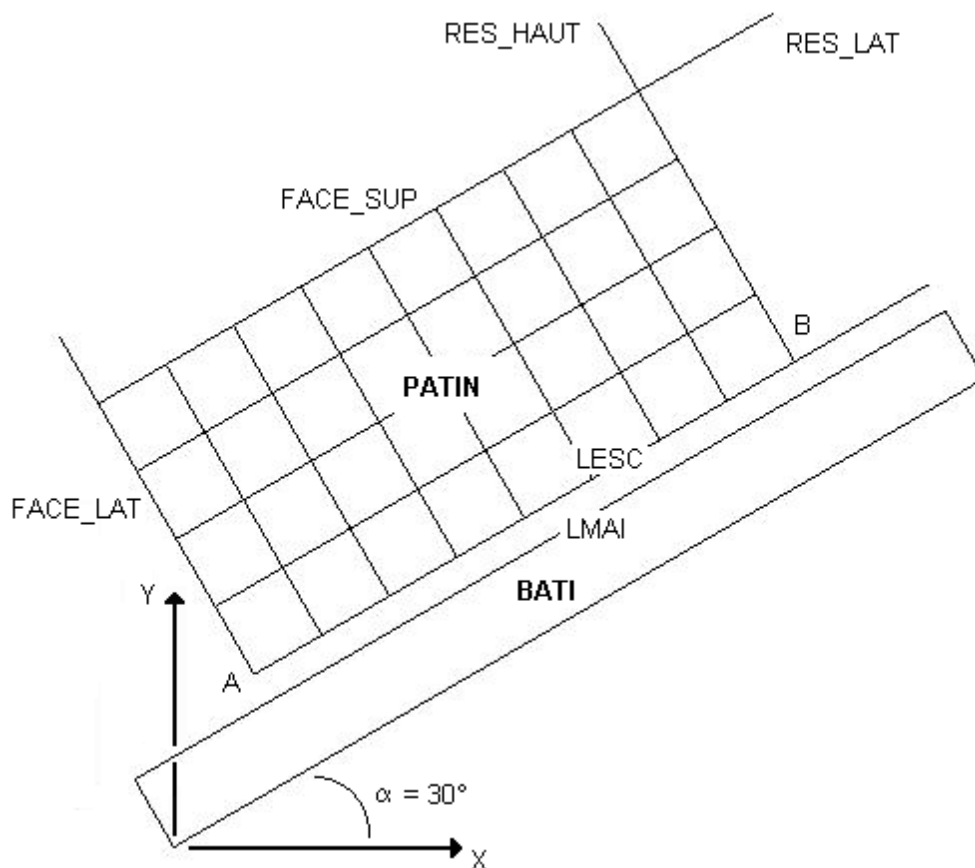
### 6.2 Remarque

Le jeu est défini dans ce cas par une fonction. Il n'y a aucune différence avec le modèle précédent où le jeu est défini de manière géométrique.

## 7 Modélisation C

### 7.1 Caractéristiques de la modélisation

Une modélisation `D_PLAN` avec des éléments `QUAD4` testant les fonctionnalités de contact nœud-maître avec frottement traité avec la méthode lagrangienne pour le contact et pénalisée pour le frottement a été mise en œuvre.



Le jeu entre le patin et le bâti est défini par les coordonnées géométriques du maillage.

Pour éviter les mouvements de corps rigide, le patin est maintenu par des ressorts de rigidité faible :

RES\_LAT :  $k = 2 \text{ N/mm}$   
RES\_HAUT :  $k = 0,005 \text{ N/mm}$

Conditions aux limites :

Extrémité libre des ressorts :  $DX = DY = 0$  .  
Bâti :  $DX = DY = 0$  .

## 7.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 53  
Nombre et types de mailles : 33 QUAD4, 32 SEG2

## 8 Résultats de la modélisation C

### 8.1 Valeurs testées

| Identification                | Référence   | Type           | Tolérance       |
|-------------------------------|-------------|----------------|-----------------|
| <b>Chargement 1</b>           |             |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| Force tangentielle de contact | 0 N         | ANALYTIQUE     | ABSOLU – 5,00%  |
| DX (point A)                  | 1,000 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point A)                  | –1,732 mm   | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |

|                               |              |                |                  |
|-------------------------------|--------------|----------------|------------------|
| DY (point B)                  | -1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00%  |
| <b>Chargement 2</b>           |              |                |                  |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00%  |
| Force tangentielle de contact | -3,564E+03 N | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00%  |
| DX (point A)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF - 2,3 0% |
| DY (point A)                  | -1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00%  |
| DX (point B)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00%  |
| DY (point B)                  | -1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00%  |
| <b>Chargement 3</b>           |              |                |                  |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00%  |
| Force tangentielle de contact | -3,624E+03 N | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00%  |
| DX (point A)                  | 8,787 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00%  |
| DY (point A)                  | 2,768 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00%  |
| DX (point B)                  | 8,787 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00%  |
| DY (point B)                  | 2,768 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00%  |

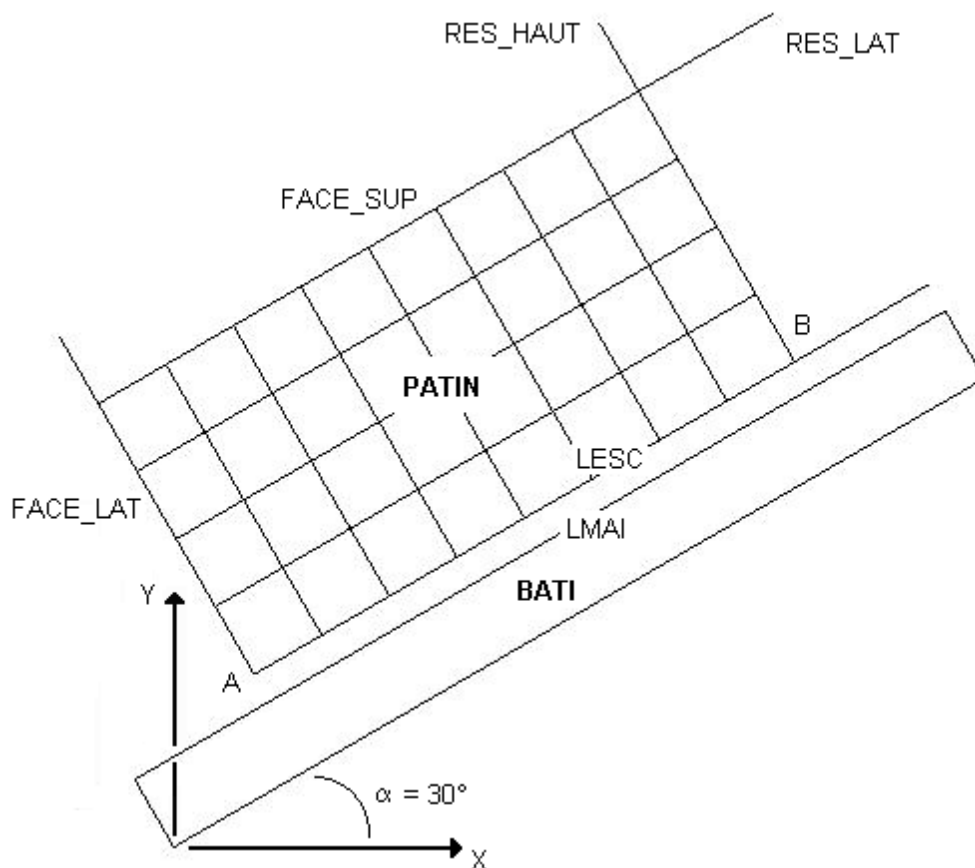
## 8.2 Remarque

Le jeu est défini dans ce cas de manière géométrique. On a la possibilité de le définir via les mots clés DIST\_1 et DIST\_2 . Après vérification, ce second cas ne change rien au résultat.

## 9 Modélisation D

### 9.1 Caractéristiques de la modélisation

Une modélisation D\_PLAN avec des éléments QUAD4 testant les fonctionnalités de contact nœud-maître avec frottement traité avec la méthode pénalisée pour le contact et le frottement a été mise en œuvre.



Le jeu entre le patin et le bâti est défini par les coordonnées géométriques du maillage.

Pour éviter les mouvements de corps rigide, le patin est maintenu par des ressorts de rigidité faible :

RES\_LAT :  $k = 2 \text{ N/mm}$   
RES\_HAUT :  $k = 0,005 \text{ N/mm}$

Conditions aux limites :

Extrémité libre des ressorts :  $DX = DY = 0$  .  
Bâti :  $DX = DY = 0$  .

## 9.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 53  
Nombre et types de mailles : 33 QUAD4, 32 SEG2

## 10 Résultats de la modélisation D

### 10.1 Valeurs testées

| Identification                | Référence   | Type           | Tolérance       |
|-------------------------------|-------------|----------------|-----------------|
| <b>Chargement 1</b>           |             |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| Force tangentielle de contact | 0 N         | ANALYTIQUE     | ABSOLU – 5,00%  |
| DX (point A)                  | 1,000 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point A)                  | –1,732 mm   | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |

|                               |              |                |                 |
|-------------------------------|--------------|----------------|-----------------|
| DY (point B)                  | -1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| <b>Chargement 2</b>           |              |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| Force tangentielle de contact | -3,564E+03 N | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| DX (point A)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF - 2,60% |
| DY (point A)                  | -1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point B)                  | -1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| <b>Chargement 3</b>           |              |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| Force tangentielle de contact | -3,624E+03 N | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| DX (point A)                  | 8,787 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point A)                  | 2,768 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point B)                  | 8,787 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point B)                  | 2,768 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF - 1,00% |

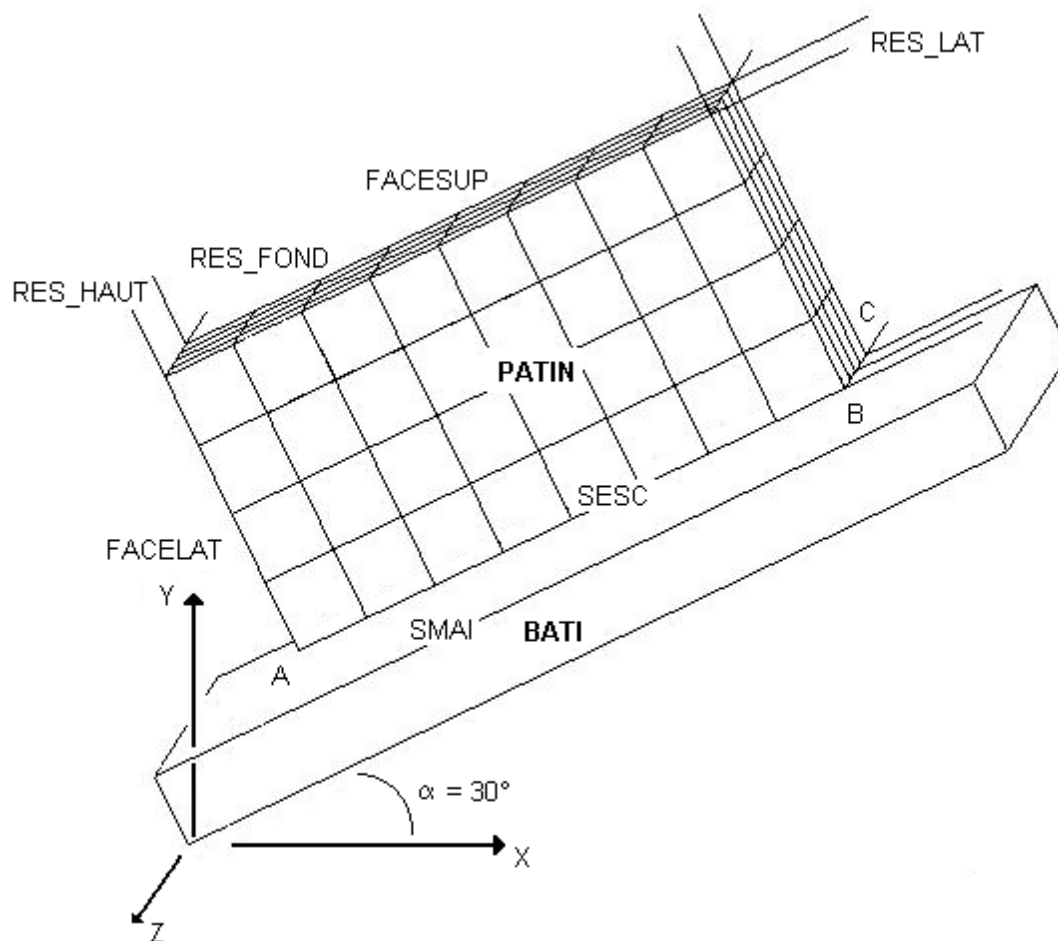
## 10.2 Remarque

Le jeu est défini dans ce cas de manière géométrique. On a la possibilité de le définir via les mots clés DIST\_1 et DIST\_2. Après vérification, ce second cas ne change rien au résultat.

## 11 Modélisation E

### 11.1 Caractéristiques de la modélisation

Une modélisation 3D avec des éléments HEXA8 testant les fonctionnalités de contact nœud-maître avec frottement traité avec la méthode lagrangienne pour le contact et pénalisée pour le frottement a été mise en œuvre.



Le jeu entre le patin et le bâti est défini par les coordonnées géométriques du maillage.

Pour éviter les mouvements de corps rigide, le patin est maintenu par des ressorts de rigidité faible :

RES\_LAT :  $k = 1 \text{ N/mm}$   
RES\_FOND :  $k = 1 \text{ N/mm}$   
RES\_HAUT :  $k = 20 \text{ N/mm}$

Conditions aux limites :

Extrémité libre des ressorts :  $DX = DY = DZ = 0$ .

Bâti :  $DX = DY = DZ = 0$ .

## 11.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 269

Nombre et type de mailles : 129 HEXA8, 103 QUAD4

## 12 Résultats de la modélisation E

### 12.1 Valeurs testées

| Identification           | Référence    | Type       | Tolérance       |
|--------------------------|--------------|------------|-----------------|
| <b>Chargement 1</b>      |              |            |                 |
| Force normale de contact | 2,0784E+05 N | ANALYTIQUE | RELATIF - 5,00% |

|                               |                |                |                 |
|-------------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| Force tangentielle de contact | -1,2000E+05 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| DX (point A)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point A)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point B)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point C)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point C)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point D)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point D)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| <b>Chargement 2</b>           |                |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,722E+05 N    | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| Force tangentielle de contact | -1,8173E+05 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| DX (point A)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 2,60% |
| DY (point A)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point B)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point C)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point C)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point D)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point D)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| <b>Chargement 3</b>           |                |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,71486E+05 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| Force tangentielle de contact | -1,82977E+05 N | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| DX (point A)                  | 8,794 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point A)                  | 2,768 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point B)                  | 8,794 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point B)                  | 2,768 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point C)                  | 8,794 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point C)                  | 2,768 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point D)                  | 8,794 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point D)                  | 2,768 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |

## 12.2 Remarques

- Le jeu est défini dans ce cas de manière géométrique, les résultats sont identiques à ceux trouvés dans la modélisation précédente.
- Les pressions normale et tangentielle au niveau de la zone de contact sont vérifiées en testant la force globale de contact dans le sens normal et tangentiel :

$$F_n^{CTAC} = p_n S_{DC} = 300 \times 40 \times 20 = 24000 \text{ N}$$

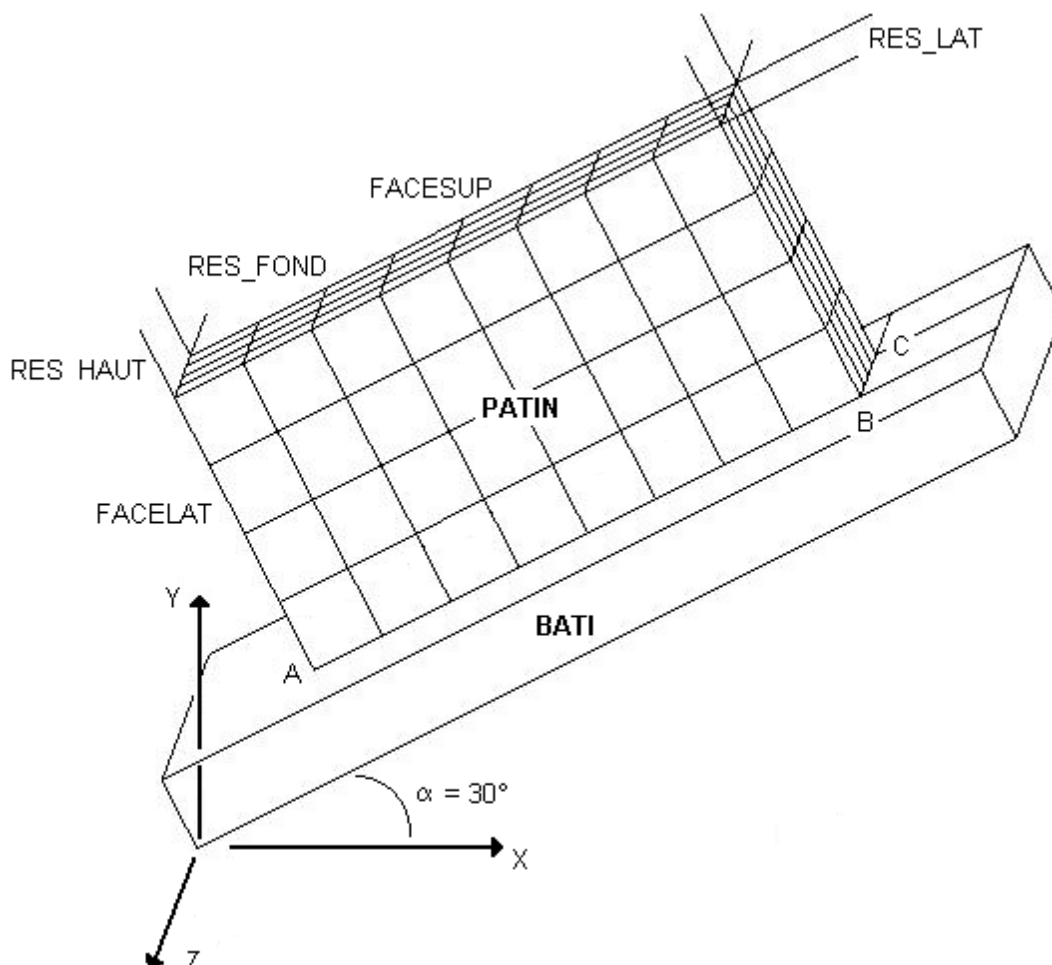
$$F_t^{CTAC} = p_t S_{AD} = 178.2 \times 20 \times 20 = 71280 \text{ N (Chargement 2)}$$

$$F_t^{CTAC} = p_t S_{AD} = 181.8 \times 20 \times 20 = 72720 \text{ N (Chargement 3)}$$

## 13 Modélisation F

### 13.1 Caractéristiques de la modélisation

Une modélisation 3D avec des éléments HEXA8 testant les fonctionnalités de contact nœud-maître avec frottement traité avec la méthode lagrangienne pour le contact et pénalisée pour le frottement a été mise en œuvre.



Le jeu entre le patin et le bâti est défini par la fonction à l'aide du mot clé « DIST\_2 ».

Pour éviter les mouvements de corps rigide, le patin est maintenu par des ressorts de rigidité faible :

$$\text{RES\_HAUT} : k = 1 \text{ N/mm}$$

RES\_FOND :  $k = 1 \text{ N/mm}$   
RES\_LAT :  $k = 20 \text{ N/mm}$

Conditions aux limites :

Extrémité libre des ressorts :  $DX = DY = DZ = 0$ .

Bâti :  $DX = DY = DZ = 0$ .

## 13.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 269

Nombre et type de mailles : 129 HEXA8, 103 QUAD4

## 14 Résultats de la modélisation F

### 14.1 Valeurs testées

| Identification                | Référence      | Type           | Tolérance       |
|-------------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| <b>Chargement 1</b>           |                |                |                 |
| Force normale de contact      | 2,0784E+05 N   | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| Force tangentielle de contact | -1,2000E+05 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| DX (point A)                  | 1,000 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point A)                  | -1,732 mm      | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point B)                  | -1,732 mm      | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point C)                  | 1,000 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point C)                  | -1,732 mm      | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point D)                  | 1,000 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point D)                  | -1,732 mm      | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| <b>Chargement 2</b>           |                |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,722E+05 N    | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| Force tangentielle de contact | -1,8173E+05 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| DX (point A)                  | 1,000 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 2,60% |
| DY (point A)                  | -1,732 mm      | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point B)                  | -1,732 mm      | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point C)                  | 1,000 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point C)                  | -1,732 mm      | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point D)                  | 1,000 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point D)                  | -1,732 mm      | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| <b>Chargement 3</b>           |                |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,71486E+05 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| Force tangentielle de contact | -1,82977E+05 N | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| DX (point A)                  | 8,794 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point A)                  | 2,768 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 8,794 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point B)                  | 2,768 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point C)                  | 8,794 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point C)                  | 2,768 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point D)                  | 8,794 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point D)                  | 2,768 mm       | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |

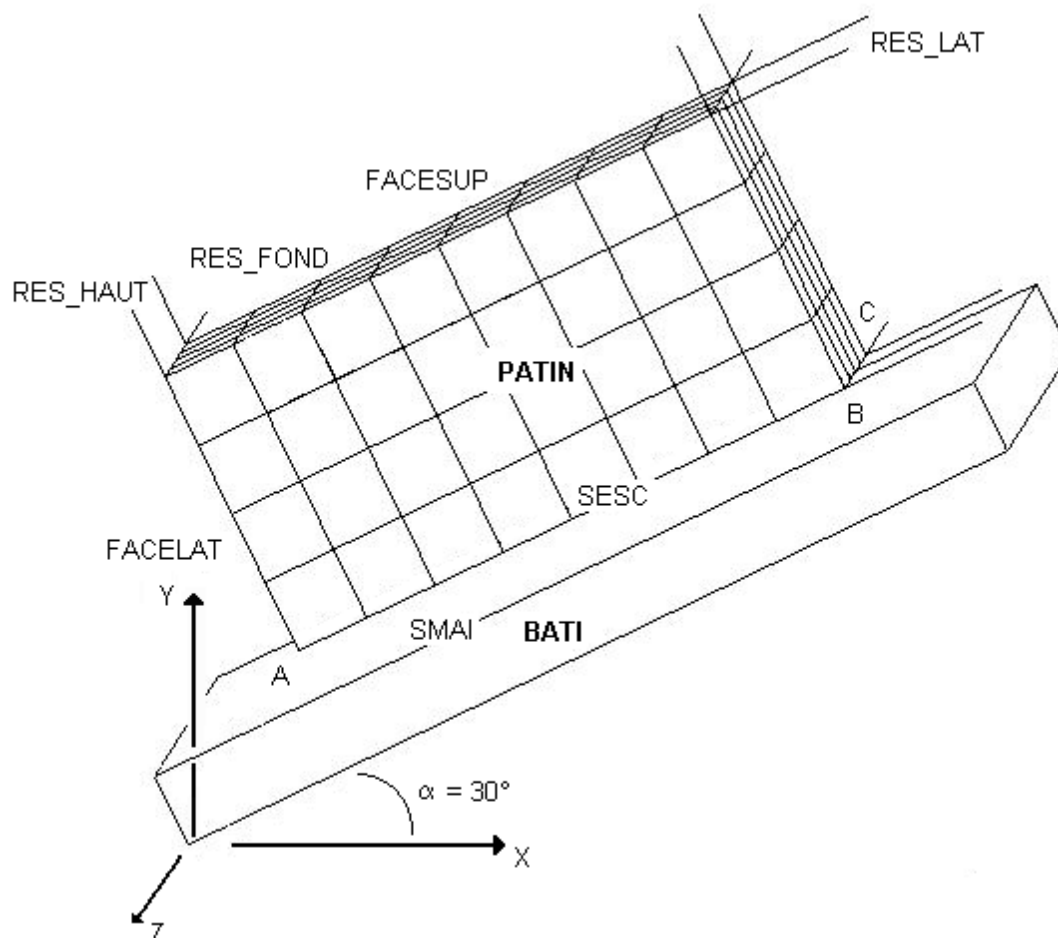
## 14.2 Remarque

Dans cette modélisation, le jeu est défini à l'aide d'une fonction, les résultats sont identiques à ceux trouvés dans la modélisation précédente.

## 15 Modélisation G

### 15.1 Caractéristiques de la modélisation

Une modélisation 3D avec des éléments HEXA8 testant les fonctionnalités de contact nœud-maillage avec frottement traité avec la méthode pénalisée pour le contact et le frottement a été mise en œuvre.



Le jeu entre le patin et le bâti est défini par les coordonnées géométriques du maillage.

Pour éviter les mouvements de corps rigide, le patin est maintenu par des ressorts de rigidité faible :

RES\_HAUT :  $k = 1 \text{ N/mm}$   
RES\_FOND :  $k = 1 \text{ N/mm}$   
RES\_LAT :  $k = 20 \text{ N/mm}$

Conditions aux limites :

Extrémité libre des ressorts :  $DX = DY = DZ = 0$ .

Bâti :  $DX = DY = DZ = 0$ .

## 15.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 269  
Nombre et type de mailles : 129 HEXA8, 103 QUAD4

## 16 Résultats de la modélisation G

### 16.1 Valeurs testées

| Identification                | Référence      | Type           | Tolérance       |
|-------------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| <b>Chargement 1</b>           |                |                |                 |
| Force normale de contact      | 2,0784E+05 N   | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| Force tangentielle de contact | -1,2000E+05 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| DX (point A)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point A)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point B)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point C)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point C)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point D)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point D)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| <b>Chargement 2</b>           |                |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,722E+05 N    | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| Force tangentielle de contact | -1,8173E+05 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| DX (point A)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 2,30% |
| DY (point A)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point B)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point C)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point C)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point D)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point D)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| <b>Chargement 3</b>           |                |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,71486E+05 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| Force tangentielle de contact | -1,82977E+05 N | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| DX (point A)                  | 8,794 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point A)                  | 2,768 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 8,794 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point B)                  | 2,768 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point C)                  | 8,794 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point C)                  | 2,768 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point D)                  | 8,794 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point D)                  | 2,768 mm       | NON REGRESSION | RELATIF – 1,00% |

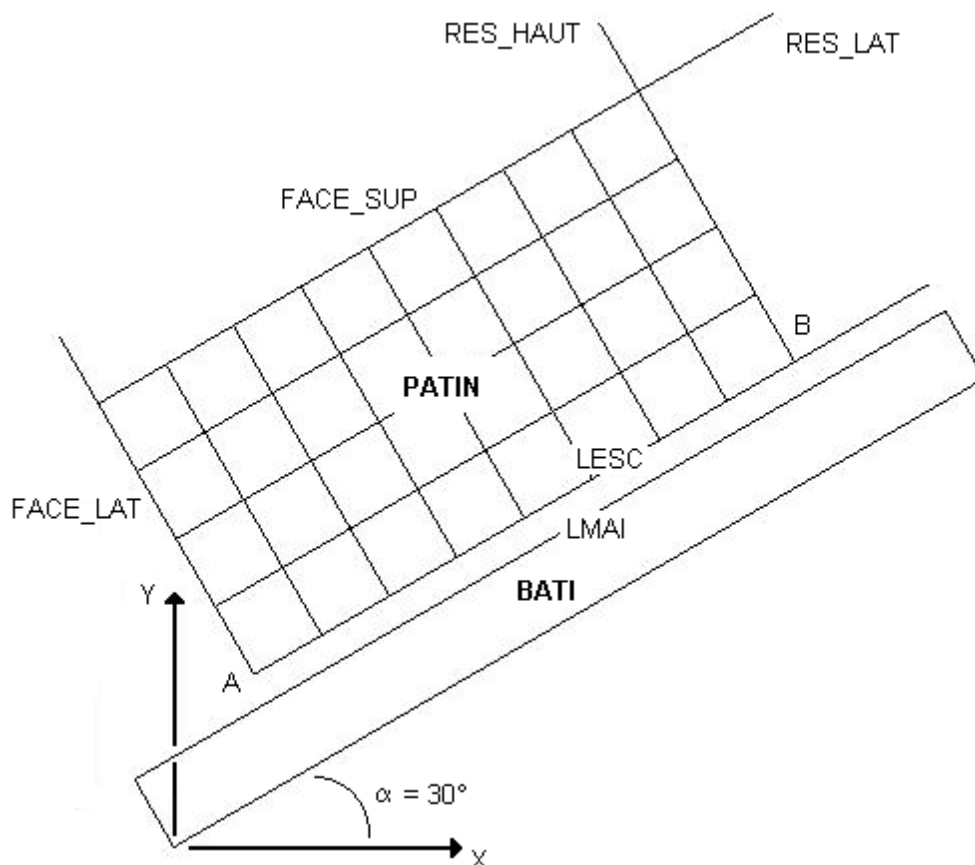
### 16.2 Remarque

Le jeu est défini dans ce cas de manière géométrique. Les résultats sont moins bons que ceux obtenus avec la pénalisation seulement sur le frottement. De plus, cette méthode est plus longue.

## 17 Modélisation H

### 17.1 Caractéristiques de la modélisation

Une modélisation `D_PLAN` avec des éléments `QUAD4` testant les fonctionnalités de contact nœud-maille avec frottement traité avec la méthode continue pour le contact et le frottement a été mise en œuvre.



Le jeu entre le patin et le bâti est défini par les coordonnées géométriques du maillage.

Pour éviter les mouvements de corps rigide, le patin est maintenu par des ressorts de rigidité faible :

RES\_LAT :  $k = 2 \text{ N/mm}$   
RES\_HAUT :  $k = 0,005 \text{ N/mm}$

Conditions aux limites :

Extrémité libre des ressorts :  $DX = DY = 0$  .

Bâti :  $DX = DY = 0$  .

### 17.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 53

Nombre et types de mailles : 33 QUAD4, 32 SEG2

## 18 Résultats de la modélisation H

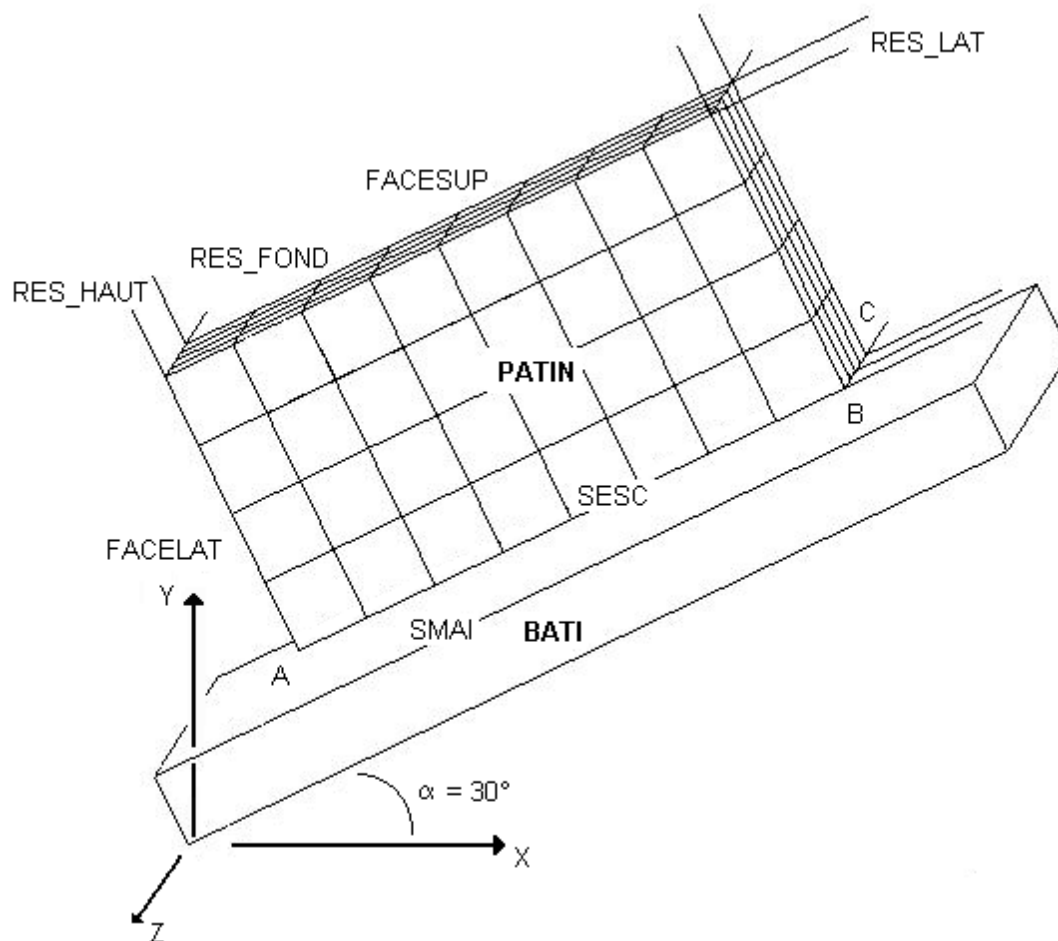
### 18.1 Valeurs testées

| Identification                | Référence    | Type           | Tolérance       |
|-------------------------------|--------------|----------------|-----------------|
| <b>Chargement 1</b>           |              |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| Force tangentielle de contact | 0 N          | ANALYTIQUE     | ABSOLU – 5,00%  |
| DX (point A)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point A)                  | –1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point B)                  | –1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| <b>Chargement 2</b>           |              |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| Force tangentielle de contact | –3,564E+03 N | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| DX (point A)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 2,60% |
| DY (point A)                  | –1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point B)                  | –1,732 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| <b>Chargement 3</b>           |              |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| Force tangentielle de contact | –3,624E+03 N | ANALYTIQUE     | RELATIF – 5,00% |
| DX (point A)                  | 8,787 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point A)                  | 2,768 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 8,787 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point B)                  | 2,768 mm     | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |

## 19 Modélisation I

### 19.1 Caractéristiques de la modélisation

Une modélisation 3D avec des éléments HEXA 8 testant les fonctionnalités de contact nœud-maître avec frottement traité avec la méthode continue pour le contact et le frottement a été mise en œuvre.



Le jeu entre le patin et le bâti est défini par les coordonnées géométriques du maillage.

Pour éviter les mouvements de corps rigide, le patin est maintenu par des ressorts de rigidité faible :

RES\_HAUT :  $k = 1 \text{ N/mm}$   
RES\_FOND :  $k = 1 \text{ N/mm}$   
RES\_LAT :  $k = 20 \text{ N/mm}$

Conditions aux limites :

Extrémité libre des ressorts :  $DX = DY = DZ = 0$ .

Bâti :  $DX = DY = DZ = 0$ .

## 19.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 269

Nombre et type de mailles : 129 HEXA8, 103 QUAD4

## 20 Résultats de la modélisation I

### 20.1 Valeurs testées

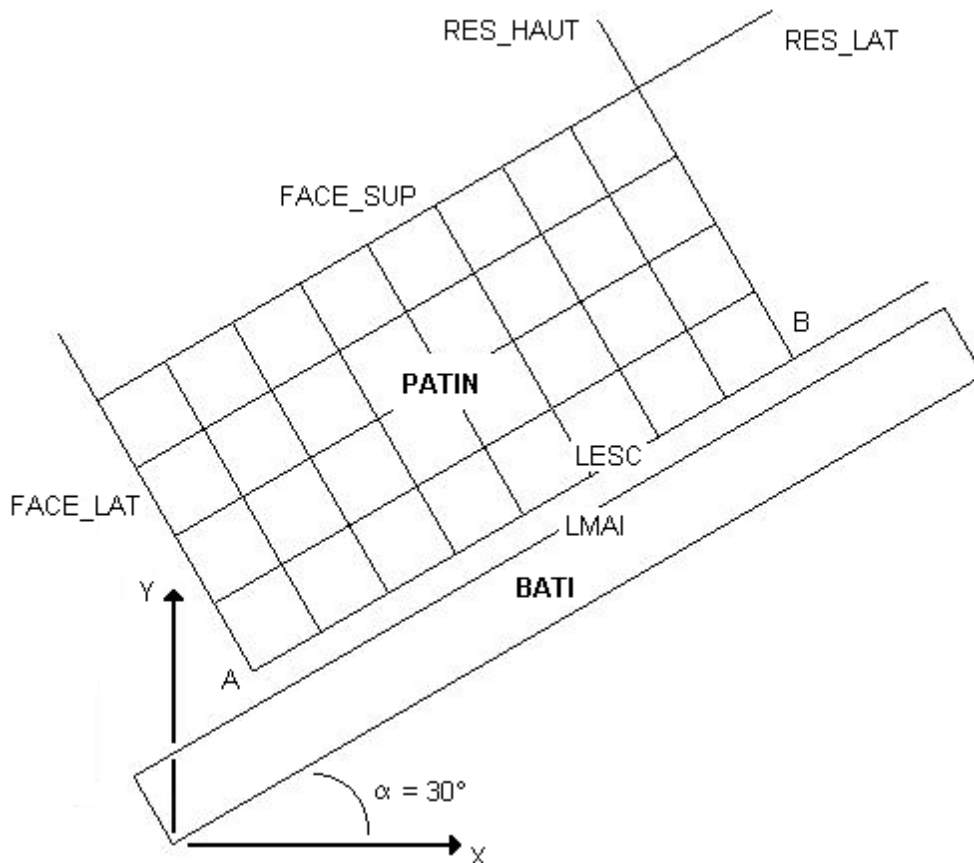
| Identification           | Référence    | Type       | Tolérance       |
|--------------------------|--------------|------------|-----------------|
| <b>Chargement 1</b>      |              |            |                 |
| Force normale de contact | 2,0784E+05 N | ANALYTIQUE | RELATIF – 5,00% |

|                               |                |                |                 |
|-------------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| Force tangentielle de contact | -1,2000E+05 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| DX (point A)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point A)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point B)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point C)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point C)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point D)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point D)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| <b>Chargement 2</b>           |                |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,722E+05 N    | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| Force tangentielle de contact | -1,8173E+05 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| DX (point A)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 2,30% |
| DY (point A)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point B)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point C)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point C)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point D)                  | 1,000 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point D)                  | -1,732 mm      | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| <b>Chargement 3</b>           |                |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,71486E+05 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| Force tangentielle de contact | -1,82977E+05 N | ANALYTIQUE     | RELATIF - 5,00% |
| DX (point A)                  | 8,794 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point A)                  | 2,768 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point B)                  | 8,794 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point B)                  | 2,768 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point C)                  | 8,794 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point C)                  | 2,768 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DX (point D)                  | 8,794 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |
| DY (point D)                  | 2,768 mm       | NON REGRESSION | RELATIF - 1,00% |

## 21 Modélisation J

### 21.1 Caractéristiques de la modélisation

Une simulation en déformations planes est effectuée: une modélisation avec des éléments QUAD4 en D\_PLA N pour les mailles du PATIN et BATI et D\_PLA N\_JOINT pour le joint FISS. On teste les fonctionnalités de contact pénalisé en compression avec frottement traité via une loi de comportement JOIN\_MECA\_FROT.



Le jeu entre le patin et le bâti n'est défini que pour la visualisation du contact, elle n'influence pas les résultats physique (particularité de modélisation de joint). Le paramètre de régularisation de la loi est choisit de sorte à n'influencer pas (moins que 0.01 %) le remplacement final de patin en glissement.

$K_N$  :  $K_n = 10^5 \text{ N/mm}^3$  paramètre de pénalisation en compression et en glissement

Pour éviter les mouvements de corps rigide, le patin est maintenu par des ressorts de rigidité faible :

RES\_LAT :  $k = 2 \text{ N/mm}$   
RES\_HAUT :  $k = 0,005 \text{ N/mm}$

Conditions aux limites :

Extrémité libre des ressorts :  $DX = DY = 0$  .  
Bâti :  $DX = DY = 0$  .

### 21.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 134

Nombre et types de mailles : 96 QUAD4, 68 SEG2

## 22 Résultats de la modélisation J

### 22.1 Valeurs testées

| Identification                | Référence    | Type           | Tolérance       |
|-------------------------------|--------------|----------------|-----------------|
| <b>Chargement 1</b>           |              |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |
| Force tangentielle de contact | 0 N          | ANALYTIQUE     | ABSOLU – 5,00%  |
| DX (point A)                  | 1,5E-3 mm    | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |
| DY (point A)                  | -2.598E-3 mm | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 1,5E-3 mm    | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |
| DY (point B)                  | -2.598E-3 mm | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |
| <b>Chargement 2</b>           |              |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |
| Force tangentielle de contact | -3,564E+03 N | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |
| DX (point A)                  | 0.0234 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point A)                  | 0.0122 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 4.032E-03 mm | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| DY (point B)                  | -4.747 mm    | NON_REGRESSION | RELATIF – 1,00% |
| <b>Chargement 3</b>           |              |                |                 |
| Force normale de contact      | 1,200E+04 N  | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |
| Force tangentielle de contact | -3,624E+03 N | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |
| DX (point A)                  | 2.598 mm     | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |
| DY (point A)                  | 1.5 mm       | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |
| DX (point B)                  | 2.598 mm     | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |
| DY (point B)                  | 1.5 mm       | ANALYTIQUE     | RELATIF – 1,00% |

Les valeurs analytiques pour le chargement 1 sont obtenues en utilisant le fait que le joint est élastique grâce au paramètre de pénalisation. C'est cette valeur qu'on projette dans le repère globale.

$$D_{norm} = P_{norm} / K_n = 300 / 10^5 = 3 \cdot 10^{-3} ; DX = D_{norm} \cos(\pi/6) ; DY = D_{norm} \sin(\pi/6)$$

## 23 Synthèse des résultats

Quelles que soit la modélisation (2D ou 3D) et la méthode de traitement du contact-frottement, les résultats obtenus sont satisfaisants. Ils sont très proches des résultats analytiques.