

Manuel de Validation**Fascicule V2.01 : Dynamique linéaire des systèmes discrets****Document V2.01.030**

SDLD30 - Réponse sismique spectrale d'un système 2 masses et 3 ressorts multi-supporté

Résumé :

Le problème consiste à calculer la réponse spectrale d'un système 2 masses - 3 ressorts soumis à une excitation sismique multiple.

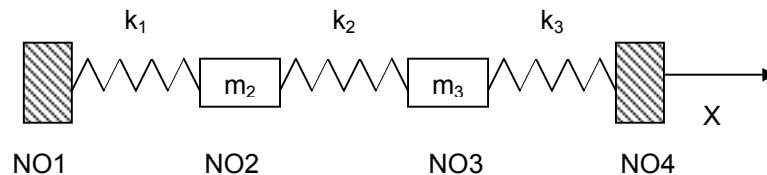
On teste l'élément discret en traction, le calcul des modes propres, des modes statiques et de la réponse spectrale par superposition modale via l'opérateur `COMB_SISM_MODAL`. Différents cumuls sont testés lors du calcul des réponses d'appuis.

Les résultats obtenus sont en très bon accord avec les résultats analytiques de référence.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

La structure est modélisée par un ensemble de 3 ressorts et de 2 masses ponctuelles.



1.2 Propriétés de matériaux

Raideur de liaison : $k_1 = k_2 = k = 1000 \text{ N/m}$; $k_3 = 10 k = 10000 \text{ N/m}$
 masse ponctuelle : $m_2 = m_3 = m = 10 \text{ kg}$.

1.3 Conditions aux limites et chargements

- conditions aux limites**

Les seuls déplacements autorisés sont les translations selon l'axe x .

Les points NO1 et NO4 sont encastrés : $DX=DY=DZ=DRX=DRY=DRZ=0$.

Les autres points sont libres en translation selon la direction x : $DY=DZ=DRX=DRY=DRZ=0$.

- chargement**

La structure est soumise à une excitation sismique spectrale multiple et à des déplacements différentiels.

Les spectres de réponses d'oscillateur en pseudo accélération sont simplifiés. Seules les valeurs correspondant aux 2 fréquences propres du système sont mentionnées. Elles ne dépendent pas de l'amortissement :

- au nœud NO1 :

$$SRO_{NO1}(f_1) = A_{11} = 7 \text{ m/s}^2$$

$$SRO_{NO1}(f_2) = A_{12} = 5 \text{ m/s}^2$$

$$DDS_{NO1} = D_1 = -0.04 \text{ m}$$

- au nœud NO4 :

$$SRO_{NO4}(f_1) = A_{21} = 12 \text{ m/s}^2$$

$$SRO_{NO4}(f_2) = A_{22} = 6 \text{ m/s}^2$$

$$DDS_{NO4} = D_2 = 0.06 \text{ m}$$

1.4 Conditions initiales

Le système est initialement au repos.

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

On calcule la réponse spectrale par superposition modale d'un système masse ressort soumis à deux excitations distinctes. On détermine le déplacement des masses et les réactions d'appui aux nœuds NO1 et NO4 suivant l'axe x.

On calcule analytiquement :

- les fréquences propres f_i ,
- les vecteurs propres associés ϕ_{Ni} normalisés par rapport à la masse modale,
- les modes statiques d'appuis ψ_j du système,
- les facteurs de participation modale P_{ij} relatif aux appuis,
- R_{mij} le maximum de la réponse de chaque mode à partir des spectres d'excitation,
- R_{ej} la contribution du mouvement d'entraînement de chaque appui à partir des déplacements différentiels,
- R_{cj} le terme de correction statique,
- les composantes primaires et secondaires de la réponse en fonction des règles de cumul adoptées.

2.2 Résultats de référence

- **matrice de rigidité K**

$$K = \begin{bmatrix} k & -k & 0 & 0 \\ -k & 2k & -k & 0 \\ 0 & -k & 11k & -10k \\ 0 & 0 & -10k & 10k \end{bmatrix}$$

- **matrice de masse M**

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- **calcul modal en base encastrée**

$$(K - \lambda_i M) \phi_i = 0 \quad \lambda_i = \omega_i^2$$

$$\Rightarrow \lambda_1 = \frac{k}{2m} (13 - \sqrt{85}) \quad \lambda_2 = \frac{k}{2m} (13 + \sqrt{85})$$

- fréquences propres :
 $\Rightarrow f_1 = \omega_1 / 2\pi \quad f_2 = \omega_2 / 2\pi$

- modes propres non normés :

$$\Rightarrow \phi_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ (-9 + \sqrt{85})/2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \phi_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ (9 + \sqrt{85})/2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

- masses modales généralisées $\mu_i = \phi_i^T M \phi_i$:

$$\Rightarrow \mu_1 = \frac{m}{4}(170 - 18\sqrt{85}) \quad \mu_2 = \frac{m}{4}(170 + 18\sqrt{85})$$

- modes propres normés à la masse modale généralisée unitaire ϕ_{Ni} :

$$\Rightarrow \phi_{N1} = \frac{\phi_1}{\sqrt{\mu_1}} \quad \phi_{N2} = \frac{\phi_2}{\sqrt{\mu_2}}$$

- réactions modales Fm_i :

$$\Rightarrow Fm_1 = K\phi_{N1} = \frac{k}{\sqrt{\mu_1}} \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 5(9 - \sqrt{85}) \end{pmatrix} \quad Fm_2 = K\phi_{N2} = \frac{k}{\sqrt{\mu_2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -5(9 + \sqrt{85}) \end{pmatrix}$$

- facteurs de participation modale $P_{ij} = \phi_i^T M \psi_j$:

- contribution du mode dynamique 1 au mouvement imposé au nœud NO1 :

$$\Rightarrow P_{11} = \phi_1^T M \psi_1 = \frac{m}{42\sqrt{\mu_1}}(13 + \sqrt{85})$$

- contribution du mode dynamique 1 au mouvement imposé au nœud NO4 :

$$\Rightarrow P_{12} = \phi_1^T M \psi_2 = \frac{10m}{21\sqrt{\mu_1}}(-8 + \sqrt{85})$$

- contribution du mode dynamique 2 au mouvement imposé au nœud NO1 :

$$\Rightarrow P_{21} = \phi_2^T M \psi_1 = \frac{m}{42\sqrt{\mu_2}}(-13 + \sqrt{85})$$

- contribution du mode dynamique 2 au mouvement imposé au nœud NO4 :

$$\Rightarrow P_{22} = \phi_2^T M \psi_2 = \frac{10m}{21\sqrt{\mu_2}}(8 + \sqrt{85})$$

- facteur de participation du mode dynamique 1 dans la direction X :

$$\Rightarrow P_{1X} = P_{11} + P_{12}$$

- facteur de participation du mode dynamique 2 dans la direction X :

$$\Rightarrow P_{2X} = P_{21} + P_{22}$$

- **modes statiques d'appuis ψ_j**

- solution statique à un déplacement unitaire du nœud NO1 :

$$\text{déplacements : } \psi_1 = \frac{1}{21} \begin{pmatrix} 21 \\ 11 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{réactions nodales : } Fs_1 = K\psi_1 = \frac{10}{21} k \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

- solution statique à un déplacement unitaire du nœud NO4 :

$$\text{déplacements : } \psi_2 = \frac{1}{21} \begin{pmatrix} 0 \\ 10 \\ 20 \\ 21 \end{pmatrix} \quad \text{réactions nodales : } Fs_2 = K\psi_2 = \frac{10}{21} k \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- **réponse du mode i au mouvement de l'appui j**

$$Rm_{ij} = r_i P_{ij} \frac{A_{ij}}{\omega_i^2} \quad \text{avec } r_i = \phi_{Ni} \text{ ou } Fm_i$$

- **correction statique**

- modes statiques u_j solution de $Ku_j = M\psi_j$:

$$\text{déplacements : } u_1 = \frac{m}{441k} \begin{pmatrix} 0 \\ 122 \\ 13 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{réactions nodales : } Fu_1 = \frac{m}{441} \begin{pmatrix} -122 \\ 231 \\ 21 \\ -130 \end{pmatrix}$$

$$\text{déplacements : } u_2 = \frac{m}{441k} \begin{pmatrix} 0 \\ 130 \\ 50 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{réactions nodales : } Fu_2 = \frac{m}{441} \begin{pmatrix} -130 \\ 210 \\ 420 \\ -500 \end{pmatrix}$$

- correction statique relative au mouvement de l'appui j si le mode 2 n'est pas retenu :

$$Rc_j = \left(ru_j - \frac{P_{1j} r_1}{\omega_1^2} \right) A_{2j} \quad \text{avec : } ru_j = u_j \text{ ou } Fu_j \text{ et } r_1 = \phi_{N1} \text{ ou } Fm_1$$

- **contribution de l'appui j au mouvement d'entraînement**

$$Re_j = r_j D_j \quad \text{avec } r_j = \psi_j \text{ ou } Fs_j$$

2.3 Incertitude sur la solution

Aucune (solution analytique exacte).

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Le système est modélisé par :

- 3 éléments discrets K_T_D_L,
- 2 éléments discrets M_T_D_N.

3.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est constitué de 3 mailles SEG2.

3.3 Fonctionnalités testées

Commandes

AFFE_MODELE	GROUP_MA	'MECANIQUE'	'DIS_T'
AFFE_CARA_ELEM	DISCRET	NOEUD	M_T_D_N
		MAILLE	K_T_D_L
AFFE_CHAR_MECA	DDL_IMPO		
MACRO_MATR_ASSE			
MODE_ITER_SIMULT	CALC_FREQ		
	METHODE	'SORENSEN'	
NORM_MODE	NORME	'MASS_GENE'	
MODE_STATIQUE	MODE_STAT		
	PSEUDO_MODE		
COMB_SISM_MODAL	MODE_CORR		
	EXCIT		
	COMB_MODE	'SRSS'	
	COMB_MULT_APPUI	'QUAD'	'LINE'
	DEPL_MULT_APPUI		
	COMB_DEPL_APPUI	'QUAD'	'LINE'
			'ABS'

4 Résultats de la modélisation A

4.1 Fréquences propres

MODE	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
1	2,18815E+00	2,18815E+00	0,000
2	5,30484E+00	5,30484E+00	0,000

4.2 Réponse globale sur base modale complète

Les modes 1 et 2 sont pris en compte. Les composantes inertielle (primaire) et statique (secondaire) de la réponse sont directement cumulées au niveau des appuis.

- calcul n°1

COMB_MODE='SRSS'
COMB_MULT_APPUI='QUAD'

- réponse de l'appui j=1 (nœud NO1) : $R_1 = \sqrt{Rm_1^2 + Re_1^2}$ avec $Rm_1 = \sqrt{Rm_{11}^2 + Rm_{21}^2}$
- réponse de l'appui j=2 (nœud NO4) : $R_2 = \sqrt{Rm_2^2 + Re_2^2}$ avec $Rm_2 = \sqrt{Rm_{12}^2 + Rm_{22}^2}$
- réponse globale : $R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2}$

déplacements absolus : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,00000E-02	4,00000E-02	0,000
NO2	5,43820E-02	5,43820E-02	0,000
NO3	5,75544E-02	5,75544E-02	0,000
NO4	6,00000E-02	6,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	5,36769E+01	5,36769E+01	0,000
NO4	7,44120E+01	7,44120E+01	0,000

- calcul n°2

COMB_MODE='SRSS'
COMB_MULT_APPUI='LINE'

- réponse de l'appui j=1 (nœud NO1) : $R_1 = \sqrt{Rm_1^2 + Re_1^2}$ avec $Rm_1 = \sqrt{Rm_{11}^2 + Rm_{21}^2}$
- réponse de l'appui j=2 (nœud NO4) : $R_2 = \sqrt{Rm_2^2 + Re_2^2}$ avec $Rm_2 = \sqrt{Rm_{12}^2 + Rm_{22}^2}$
- réponse globale : $R = R_1 + R_2$

déplacements absolus : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,00000E-02	4,00000E-02	0,000
NO2	7,48259E-02	7,48259E-02	0,000
NO3	6,03377E-02	6,03377E-02	0,000
NO4	6,00000E-02	6,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	7,34576E+01	7,34576E+01	0,000
NO4	9,72617E+01	9,72617E+01	0,000

4.3 Réponse globale sur base modale incomplète sans correction statique

Seul le mode 1 est pris en compte. Les composantes inertielle (primaire) et statique (secondaire) de la réponse sont directement cumulées au niveau des appuis.

- calcul n°1

COMB_MODE='SRSS'
COMB_MULT_APPUI='QUAD'

- réponse de l'appui j=1 (nœud NO1) : $R_1 = \sqrt{Rm_1^2 + Re_1^2}$ avec $Rm_1 = Rm_{11}$
- réponse de l'appui j=2 (nœud NO4) : $R_2 = \sqrt{Rm_2^2 + Re_2^2}$ avec $Rm_2 = Rm_{12}$
- réponse globale : $R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2}$

déplacements absolus : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,00000E-02	4,00000E-02	0,000
NO2	5,43794E-02	5,43794E-02	0,000
NO3	5,73536E-02	5,73536E-02	0,000
NO4	6,00000E-02	6,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	5,36743E+01	5,36743E+01	0,000
NO4	5,68312E+01	5,68312E+01	0,000

• calcul n°2

COMB_MODE='SRSS'
COMB_MULT_APPUI='LINE'

- réponse de l'appui j=1 (nœud NO1) : $R_1 = \sqrt{Rm_1^2 + Re_1^2}$ avec $Rm_1 = Rm_{11}$
- réponse de l'appui j=2 (nœud NO4) : $R_2 = \sqrt{Rm_2^2 + Re_2^2}$ avec $Rm_2 = Rm_{12}$
- réponse globale : $R = R_1 + R_2$

déplacements absolus : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,00000E-02	4,00000E-02	0,000
NO2	7,48229E-02	7,48229E-02	0,000
NO3	6,01363E-02	6,01363E-02	0,000
NO4	6,00000E-02	6,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	7,34546E+01	7,34546E+01	0,000
NO4	7,76841E+01	7,76841E+01	0,000

4.4 Réponse globale sur base modale incomplète avec correction statique

Seul le mode 1 intervient dans le calcul de la réponse. La contribution statique du mode 2 négligé est prise en compte.

• calcul n°1

COMB_MODE='SRSS'
COMB_MULT_APPUI='QUAD'

- réponse de l'appui j=1 (nœud NO1) : $R_1 = \sqrt{Rm_1^2 + Rc_1^2 + Re_1^2}$ avec $Rm_1 = Rm_{11}$
- réponse de l'appui j=2 (nœud NO4) : $R_2 = \sqrt{Rm_2^2 + Rc_2^2 + Re_2^2}$ avec $Rm_2 = Rm_{12}$
- réponse globale : $R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2}$

déplacements absolus : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,00000E-02	4,00000E-02	0,000
NO2	5,43820E-02	5,43820E-02	0,000
NO3	5,75544E-02	5,75544E-02	0,000
NO4	6,00000E-02	6,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	5,36769E+01	5,36769E+01	0,000
NO4	7,44120E+01	7,44120E+01	0,000

- calcul n°2

COMB_MODE='SRSS'
COMB_MULT_APPUI='LINE'

- réponse de l'appui j=1 (nœud NO1) : $R_1 = \sqrt{Rm_1^2 + Rc_1^2 + Re_1^2}$ avec $Rm_1 = Rm_{11}$
- réponse de l'appui j=2 (nœud NO4) : $R_2 = \sqrt{Rm_2^2 + Rc_2^2 + Re_2^2}$ avec $Rm_2 = Rm_{12}$
- réponse globale : $R = R_1 + R_2$

déplacements absolus : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,00000E-02	4,00000E-02	0,000
NO2	7,48259E-02	7,48259E-02	0,000
NO3	6,03377E-02	6,03377E-02	0,000
NO4	6,00000E-02	6,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	7,34576E+01	7,34576E+01	0,000
NO4	9,72617E+01	9,72617E+01	0,000

4.5 Partition des composantes primaire et secondaire de la réponse

Les composantes inertielle (primaire) et statique (secondaire) sont traitées séparément.

- calcul n°1

- réponse primaire sur base modale complète (modes 1 et 2)

COMB_MODE='SRSS'
COMB_MULT_APPUI='QUAD'

- réponse de l'appui j=1 (nœud NO1) : $RI_1 = \sqrt{Rm_{11}^2 + Rm_{21}^2}$
- réponse de l'appui j=2 (nœud NO4) : $RI_2 = \sqrt{Rm_{12}^2 + Rm_{22}^2}$
- réponse primaire : $RI = \sqrt{RI_1^2 + RI_2^2}$

déplacements relatifs : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	0,00000E+00	0,00000E+00	-
NO2	4,12562E-02	4,12562E-02	0,000
NO3	6,60152E-03	6,60152E-03	0,000
NO4	0,00000E+00	0,00000E+00	-

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,12562E+01	4,12562E+01	0,000
NO4	6,60152E+01	6,60152E+01	0,000

- réponse secondaire
COMB_DEPL_APPUI='QUAD'

$$- \text{réponse secondaire : } RII = \sqrt{Re_1^2 + Re_2^2}$$

déplacements d'entraînement : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,00000E-02	4,00000E-02	0,000
NO2	3,54306E-02	3,54306E-02	0,000
NO3	5,71746E-02	5,71746E-02	0,000
NO4	6,00000E-02	6,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	3,43386E+01	3,43386E+01	0,000
NO4	3,43386E+01	3,43386E+01	0,000

• calcul n°2

- réponse primaire sur base modale incomplète sans correction statique
Seul le mode 1 intervient dans le calcul de la réponse
COMB_MODE='SRSS'
COMB_MULT_APPUI='QUAD'

- réponse de l'appui j=1 (nœud NO1) : $RI_1 = Rm_{11}$
- réponse de l'appui j=2 (nœud NO4) : $RI_2 = Rm_{12}$
- réponse primaire : $RI = \sqrt{RI_1^2 + RI_2^2}$

déplacements relatifs : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	0,00000E+00	0,00000E+00	-
NO2	4,12528E-02	4,12528E-02	0,000
NO3	4,52841E-03	4,52841E-03	0,000
NO4	0,00000E+00	0,00000E+00	-

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,12528E+01	4,12528E+01	0,000
NO4	4,52841E+01	4,52841E+01	0,000

- réponse secondaire
COMB_DEPL_APPUI='LINE'

$$- \text{réponse secondaire : } RII = Re_1 + Re_2$$

déplacements d'entraînement : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	-4,00000E-02	-4,00000E-02	0,000
NO2	7,61905E-03	7,61905E-03	0,000
NO3	5,52381E-02	5,52381E-02	0,000
NO4	6,00000E-02	6,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	-4,76190E+01	-4,76190E+01	0,000
NO4	4,76190E+01	4,76190E+01	0,000

• calcul n°3

- réponse primaire sur base modale incomplète avec correction statique
Seul le mode 1 intervient dans le calcul de la réponse
COMB_MODE='SRSS'
COMB_MULT_APPUI='QUAD'

- réponse de l'appui j=1 (nœud NO1) : $RI_1 = \sqrt{Rm_{11}^2 + Rc_1^2}$
- réponse de l'appui j=2 (nœud NO4) : $RI_2 = \sqrt{Rm_{12}^2 + Rc_2^2}$
- réponse primaire : $RI = \sqrt{RI_1^2 + RI_2^2}$

déplacements relatifs : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	0,00000E+00	0,00000E+00	-
NO2	4,12562E-02	4,12562E-02	0,000
NO3	6,60152E-03	6,60152E-03	0,000
NO4	0,00000E+00	0,00000E+00	-

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,12562E+01	4,12562E+01	0,000
NO4	6,60152E+01	6,60152E+01	0,000

- réponse secondaire
COMB_DEPL_APPUI='ABS'

- réponse secondaire : $RII = |Re_1| + |Re_2|$

déplacements d'entraînement : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,00000E-02	4,00000E-02	0,000
NO2	4,95238E-02	4,95238E-02	0,000
NO3	5,90476E-02	5,90476E-02	0,000
NO4	6,00000E-02	6,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,76190E+01	4,76190E+01	0,000
NO4	4,76190E+01	4,76190E+01	0,000

• calcul n°4

- réponse primaire sur base modale incomplète avec correction statique

Seul le mode 1 intervient dans le calcul de la réponse.

COMB_MODE='SRSS'

COMB_MULT_APPUI='QUAD'

- réponse de l'appui j=1 (nœud NO1) : $RI_1 = \sqrt{Rm_{11}^2 + Rc_1^2}$
- réponse de l'appui j=2 (nœud NO4) : $RI_2 = \sqrt{Rm_{12}^2 + Rc_2^2}$
- réponse primaire : $RI = \sqrt{RI_1^2 + RI_2^2}$
- réponse secondaire : test cumul de DDSs

5 cas de charge sont définis. Les 5 réponses statiques élémentaires associées sont :

- cas a : $DDSa_{NO1} = -0.04 \Rightarrow Ra = r_1 \times DDSa_{NO1}$
- cas b : $DD Sb_{NO4} = 0.06 \Rightarrow Rb = r_2 \times DD Sb_{NO4}$
- cas c : $DD Sc_{NO4} = 0.03 \Rightarrow Rc = r_2 \times DD Sc_{NO4}$
- cas d : $DD Sd_{NO1} = -0.07 \Rightarrow Rd = r_1 \times DD Sd_{NO1}$
- cas e : $DD Se_{NO4} = 0.05 \Rightarrow Re = r_2 \times DD Se_{NO4}$

4 combinaisons sont calculées :

• combinaison n°1

cumul linéaire des cas a et b : TYPE_COMBI='LINE' NUME_ORDRE=200

réponse secondaire : $RII_1 = Ra + Rb$

déplacements absolus : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	-4,00000E-02	-4,00000E-02	0,000
NO2	7,61905E-03	7,61905E-03	0,000
NO3	5,52381E-02	5,52381E-02	0,000
NO4	6,00000E-02	6,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	-4,76190E+01	-4,76190E+01	0,000
NO4	4,76190E+01	4,76190E+01	0,000

- combinaison n°2

cumul absolu des cas a et c : TYPE_COMBI='ABS' NUME_ORDRE=201

$$\text{réponse secondaire : } RII_2 = |Ra| + |Rc|$$

déplacements absolus : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,00000E-02	4,00000E-02	0,000
NO2	3,52381E-02	3,52381E-02	0,000
NO3	3,04762E-02	3,04762E-02	0,000
NO4	3,00000E-02	3,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	3,33333E+01	3,33333E+01	0,000
NO4	3,33333E+01	3,33333E+01	0,000

- combinaison n°3

cumul quadratique des cas d et e : TYPE_COMBI='QUAD' NUME_ORDRE=202

$$\text{réponse secondaire : } RII_3 = \sqrt{Rd^2 + Re^2}$$

déplacements absolus : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	7,00000E-02	7,00000E-02	0,000
NO2	4,37189E-02	4,37189E-02	0,000
NO3	4,77356E-02	4,77356E-02	0,000
NO4	5,00000E-02	5,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	4,09635E+01	4,09635E+01	0,000
NO4	4,09635E+01	4,09635E+01	0,000

- combinaison n°4

cumul linéaire des cas a et e : TYPE_COMBI='LINE' NUME_ORDRE=203

réponse secondaire : $RII_4 = Ra + Re$

déplacements absolus : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	-4,00000E-02	-4,00000E-02	0,000
NO2	2,85714E-03	2,85714E-03	0,000
NO3	4,57143E-02	4,57143E-02	0,000
NO4	5,00000E-02	5,00000E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	-4,28571E+01	-4,28571E+01	0,000
NO4	4,28571E+01	4,28571E+01	0,000

La réponse secondaire totale est établie par le cumul quadratique des 4 combinaisons precedents :

$$RII = \sqrt{RII_1^2 + RII_2^2 + RII_3^2 + RII_4^2} \quad \text{NUME_ORDRE}=204$$

déplacements absolus : DEPL

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	9,84886E-02	9,84886E-02	0,000
NO2	5,67386E-02	5,67386E-02	0,000
NO3	9,13703E-02	9,13703E-02	0,000
NO4	9,74679E-02	9,74679E-02	0,000

réactions nodales : REAC_NODA

NOEUD	Référence	Code_Aster	Erreur relative (%)
NO1	8,30266E+01	8,30266E+01	0,000
NO4	8,30266E+01	8,30266E+01	0,000

5 Synthèse des résultats

Les résultats obtenus avec le *Code_Aster* sont conformes aux résultats analytiques de référence.